INVESTIGACION y CIENCIA

CIENCIA Y TECNICA EN ESPAÑA

MICROORGANISMOS DE LAS ENTRAÑAS DE LA TIERRA

AZAR BENIGNO, AZAR SALVAJE

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



FISICA ATOMICA DEL ROZAMIENTO

DICIEMBRE 1996
800 PTAS.




Diciembre de 1996 Número 243

SECCIONES



Portada: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7-11	Angel Pestaña
12	Jordi Pareto (*fotografía*); Angel Pestaña (*gráfica*)
14-20	Documentos PLS
22-23	George Retseck; David Boone, Instituto Graduado de Oregón (*fotografía*)
24-25	Phil Long, Battelle, Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico (*arriba*); George Retseck (*abajo*)
26	George Retseck (*diagrama*); Sandra A. Nierwicki-Baur, Instituto Politécnico Rensselaer (*micrografía*)
27	James K. Fredrickson
40-42	Stephen Ferry
43	Jared Schneidman Design
44	Johnny Johnson
45	Steve Murez, *Black Star*
46-47	FPG Internacional
48	Biblioteca de la Universidad de Leeds
49	Jared Schneidman Design
50-51	Michael Goodman (*arriba*); Jared Schneidman Design (*abajo*)
52	Judith A. Harrison, Academia Naval de EE.UU.
54	Julia Margaret Cameron
55	Archivo de la Sociedad para la Investigación Psíquica; Biblioteca de la Universidad de Cambridge
56	Biblioteca de imágenes Mary Evans
57	Cortesía del Museo Wedgwood (*arriba*); cortesía de Gareth Nelson (*abajo*)
58	Biblioteca de imágenes Mary Evans
59	Michael Huxley
60-63	Laurie Grace
67-71	Le Scienze SpA
78-79	Bryan Christie
81	Hasbro, Inc.
82	Jennifer C. Christiansen
83	Norman Gallatin
96	Xerox Corporation; Barry Ross (*dibujos*)

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Del azar benigno al azar salvaje*, *¿Existen límites lógicos para el conocer?*, *De cerca* y *Juegos matemáticos*; Sebastián Méndez Alvarez: *Vida en las profundidades de la Tierra*; Juan Pedro Campos: *Rozamiento a escala atómica*; José M. García de la Mora: *Charles Darwin y Alfred Wallace ante el espiritismo*; Carlos Pérez García: *El ruido 1/f*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting y Timothy M. Beardsley, *Associate Editors*; John Horgan, *Senior Writer*; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Ya se están cosechando los primeros frutos del “arte de la paz” atómico. Con las mismas técnicas que produjeron la bomba, los laboratorios de Oak Ridge están ahora fabricando isótopos radiactivos. Mucho se ha escrito acerca del uso de sustancias radiactivas en el marcaje de vitaminas, aminoácidos y otros carburantes necesarios para el funcionamiento de la maquinaria humana, pero se han pasado por alto los beneficios que reporta a la industria. Son numerosos los productos químicos que se forman mediante procesos harto misteriosos. Los isótopos, al ser “observadores” a escala atómica, pueden ayudar a correr el velo de tales misterios.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El doctor Shibasaburo Kitasato ha reunido, de fuentes fiables, información acerca de 26.521 casos de difteria registrados en Japón antes de la introducción de la sueroterapia, 14.996 de los cuales fueron defunciones (56 por ciento). Entre los 353 casos tratados tras la introducción en Japón de la sueroterapia, desde noviembre de 1894 hasta noviembre de 1896, sólo se dieron 31 defunciones (8,79 por ciento). Hay razones para creer que podría rebajarse la mortalidad si el tratamiento empezara en las fases iniciales de la enfermedad. Así, los 110 casos en los que se aplicaron las inyecciones antes de cuarenta y ocho horas después de la infección se recuperaron todos. Por otra parte, de los 33 casos tratados después del octavo día de enfermedad (incluidos algunos pacientes moribundos), 11 no pudieron salvar la vida.»

«Herr G. Kraus ha investigado el objeto de la elevación de temperatura que acompaña a la floración de diversas especies de acacias y palmáceas. En *Ceratozamia longifolia* descubrió que esa elevación tiene lugar durante el día, llegando a un máximo de 11,7 ºC por encima de la temperatura ambiental. En las acacias examinadas, la elevación de temperatura está acompañada por un rápido consumo de almidón y azúcar. El doctor Stahl ve en ello un mecanismo para atraer insectos polinizadores.»

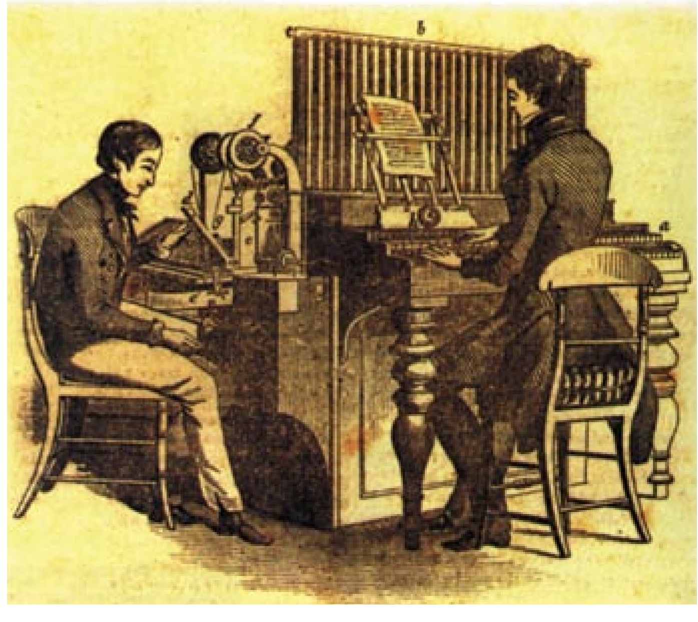
«Por su aplicación a la fabricación de cubiertas de neumáticos y biberones, el caucho de la India se está convirtiendo en una necesidad básica de la civilización. Pero son pocas las plantas productoras que se hallan a distancias cómodas de los tinglados de exportación. Centenares de personas se han devanado los sesos en busca de un sustituto, pero nadie ha resuelto el problema. Está por ver si nuestro país, u otro cualquiera, quiere entrar en esta rama de la silvicultura tropical. Los alemanes, con su tenacidad característica, disponen de un potente equipo científico en el Camerún. Los ingleses, con su habitual improvisación, se conforman con mandarlo al Jardín Botánico de Kew para que elabore informes. Pero al menos el gobierno indio ha intentado un experimento a gran escala en Assam, mediante un vivero de árboles de caucho del Pará que se extiende sobre casi 52.000 hectáreas.»

...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El nuevo planeta [Neptuno], descubierto por Urbain Leverrier, tiene un tamaño de doscientas treinta veces el de la Tierra, y es el mayor del sistema solar. Este descubrimiento quizá sea el triunfo más sonado de la ciencia hasta la fecha. Un joven astrónomo francés se pone a trabajar para comprobar la causa de las aberraciones del planeta Herschel [Urano] en su órbita. Descubre así que otro planeta, de cierto tamaño, situado a una distancia al Sol casi el doble que la de Herschel, produciría exactamente los mismos efectos que él observaba. Calcula entonces su posición en el firmamento, con tal precisión que los astrónomos, al dirigir los telescopios al punto donde se predice que ha de estar ese anochecer, todos consiguen encontrarlo allá.»

«Una nueva y original partida en la minuta de un abogado. Cierto procurador que había sido empleado por una compañía ferroviaria inglesa, al redactar su minuta, tras enumerar todos los apartados rutinarios, agrega el siguiente: “Por ansiedad mental, partida no mencionada antes, 2000 libras esterlinas”. Se le pagó sin rechistar.»

«La máquina tipográfica Clay y Rosenberg está expresamente adaptada a todos los tipos de composición simple, poesía o prosa. La fuerza motriz la recibe a través de una manivela giratoria y puede accionarse por vapor; viene a ser, pues, *una máquina tipográfica a vapor*. Recuerda, por su forma, a un piano rural, con dos hileras de teclas. Para manejarla se requiere un hombre adulto y cuatro aprendices; cuando está en pleno funcionamiento, atiende al trabajo de hasta ocho cajistas.»



La nueva máquina tipográfica

El sistema español de ciencia y técnica

Los indicadores de estado del sistema de investigación y desarrollo muestran la existencia de un hiato creciente entre la investigación científica y el desarrollo técnico español. Urge corregir tal desarticulación

Angel Pestaña

Las relaciones entre la investigación científica y el desarrollo técnico están vinculadas históricamente a la revolución industrial, sobre todo a partir de la segunda mitad del siglo XIX, cuando aparecen los primeros laboratorios industriales. Desde entonces, los lazos entre ambos tipos de actividad han ido estrechándose, en la medida en que la técnica, la competitividad industrial y el desarrollo económico se han hecho progresivamente dependientes del avance del conocimiento científico. De ahí la preocupación por la coordinación de las políticas económica y científico-técnicas y el peso relativo de los instrumentos públicos de promoción frente a la iniciativa empresarial en el desarrollo. En cualquiera de los supuestos es imprescindible disponer de un conocimiento lo más definido posible de lo que se ha convenido en denominar Sistema de Ciencia y Técnica (SCT). Por tal se entiende el conjunto estructurado de recursos y actividades relacionadas con la producción y difusión del conocimiento científico y su incorporación a los procesos de producción de bienes y servicios.

El conocimiento de la estructura, dimensiones y funcionalidad del SCT está íntimamente asociado a la disponibilidad de un sistema de medición y valoración continuado, cuyo principal exponente son los indicadores de actividad científica y técnica, implantados en los países de la OCDE desde 1961 y recogidos en publicaciones bienales. Los indicadores de la OCDE miden los recursos del sistema en términos de personal y gastos en investigación y desarrollo (I+D) según el origen de los fondos, sector de ejecución, objetivo socioeconómico y tipo de actividad, incluyendo en el caso de las empresas un análisis sectorial pormenorizado. Pero se carece de un sistema estándar para medir los resultados directos de la actividad I+D.

En cienciometría, las actividades de I+D se clasifican en tres tipos: básica, aplicada y de desarrollo experimental; el peso relativo de un tipo u otro varía según la tradición y nivel de desarrollo técnico-industrial de los países. La investigación básica representa un 15-20 % de los recursos de I+D, se ejecuta preferentemente en la universidad y se expresa en forma de publicación científica. Por el contrario, la investigación aplicada y, sobre todo, la encaminada al desarrollo experimental se ejecuta en gran parte en el ámbito empresarial y tiene su expresión en informes de circulación interna, licencias y patentes.

El recuento de publicaciones constituye el sistema universal para medir la actividad y capacidad científica, especialmente en investigación básica. En la práctica, se tiende a considerar sólo las publicaciones registradas en la base de datos *Science Citation Index* del Instituto de Información Científica (ISI). Ello supone dejar fuera de toda consideración otras publicaciones también sometidas a la revisión por expertos pero que por su lenguaje o especialización (recursos naturales o ingeniería) tienen un carácter más local. En cualquier caso, y a pesar de su sesgo proclive a las revistas de publicación en lengua inglesa, la base de datos del ISI se ha convertido en el estándar internacional para medir la producción científica; se ha incorporado en el Informe Europeo sobre Indicadores de Ciencia y Técnica (ERSTI), elaborado para la Comisión Europea. En este estudio, que servirá de referencia para buena parte de los datos manejados en nuestro artículo, se han incorporado también los datos procedentes de los registros internacionales de patentes, el europeo (EPO) y el norteamericano (USPTO), por considerar que están directamente relacionados con la capacidad de invención y el desarrollo tecnológico e industrial.

Antes de entrar en la valoración de la situación actual del sistema español de ciencia y técnica en relación con el contexto europeo, parece conveniente establecer de manera sucinta el proceso histórico de su estructuración y funcionalidad en los últimos cincuenta años. Como es sabido, tras la guerra civil, las iniciativas estatales en ciencia y técnica se organizan en torno al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Modelado sobre el francés Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), el CSIC acapara las funciones de asesoramiento, fomento, orientación y coordinación de la investigación científica nacional (lo que en cienciología se identifica como niveles I y II) junto con la ejecución de actividades I+D (nivel III) a través de sus centros propios, secciones universitarias y centros coordinados con universidades. Además de su

ANGEL PESTAÑA es investigador del CSIC en el Instituto de Investigaciones Biomédicas, donde dirige un grupo de trabajo sobre genética molecular del cáncer humano. También está interesado en las consecuencias sociales y económicas de la actividad científica y en la valoración de la ciencia como producto susceptible de cuantificación (cienciometría).

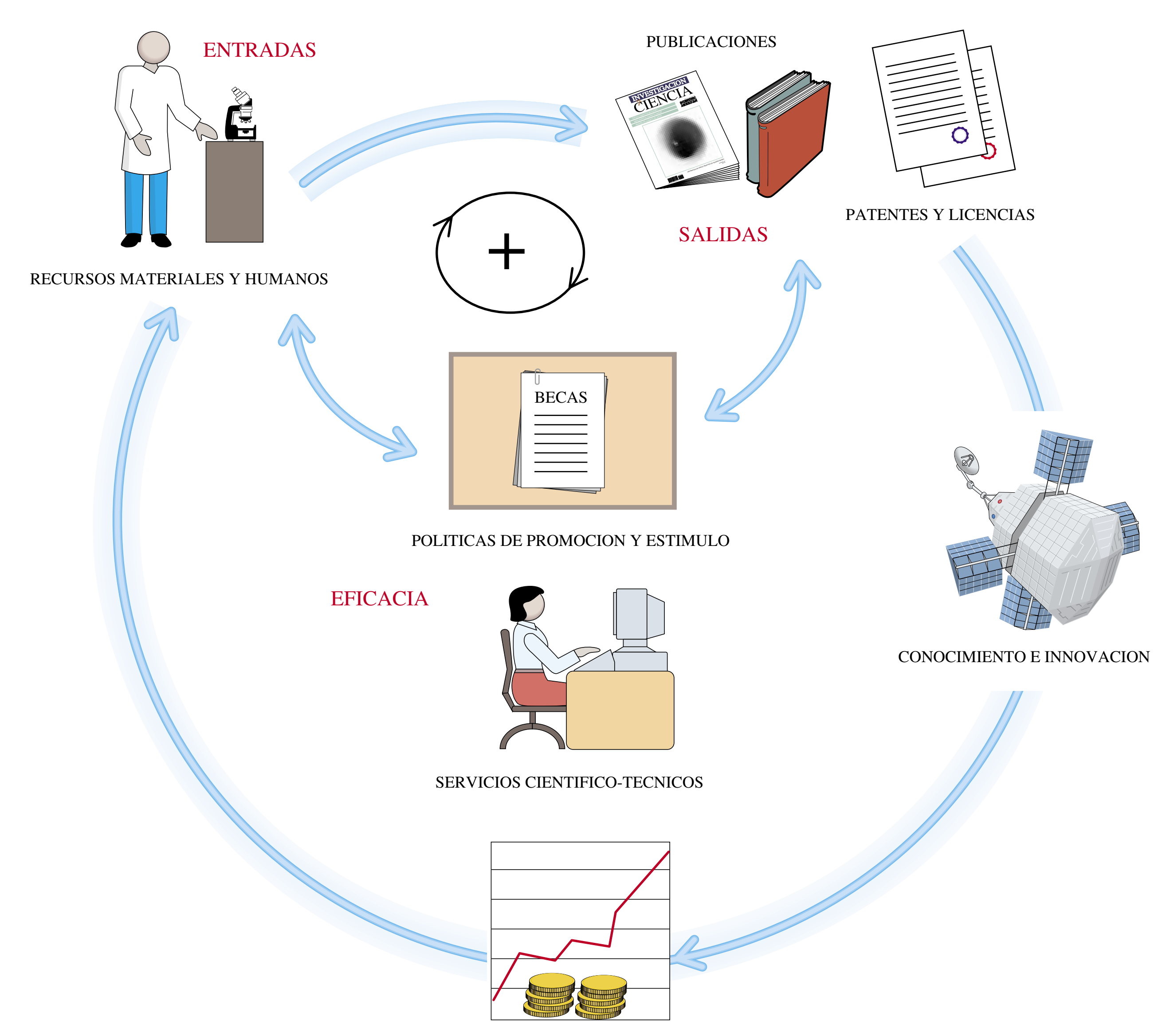
GASTOS I+D/VABcf×100

GALICIA 0,5
ASTURIAS 0,55
CANTABRIA 0,58
PAIS VASCO 1,2
NAVARRA 0,95
RIOJA 0,35
CASTILLA-LEON 0,8
ARAGON 0,75
CATALUÑA 1,05
MADRID 2,25
EXTREMADURA 0,3
CASTILLA LA MANCHA 0,2
VALENCIA 0,6
BALEARES 0,1
MURCIA 0,6
ANDALUCIA 0,7
CANARIAS 0,51
Media CEE/12 año 1992: 2,0
Media España año 1992: 1,0



FUENTE: Instituto Nacional de Estadística

1. REGIONALIZACION del esfuerzo en I+D en 1993. (VABcf designa el valor añadido bruto al coste de factores).



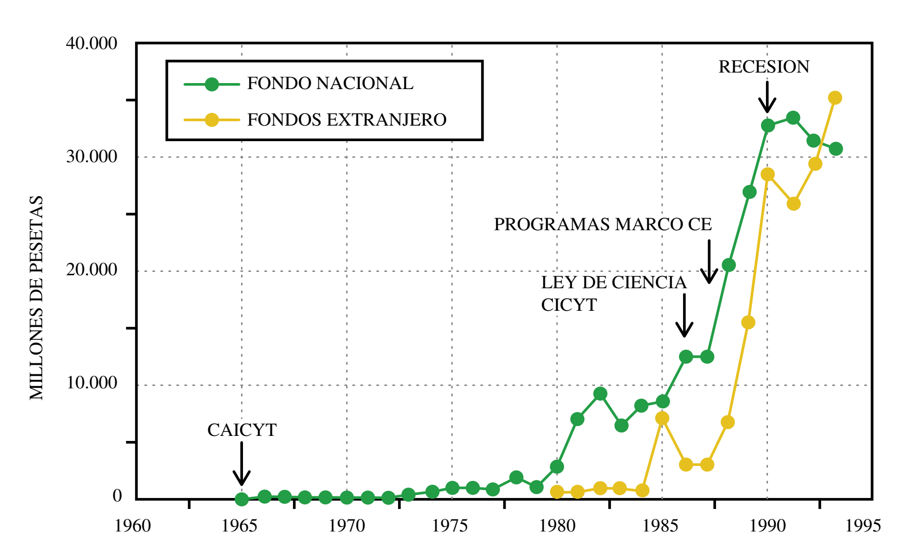
2. MODELO GENERALIZADO de un sistema de ciencia y técnica y sus relaciones con el sistema productivo. Los trabajadores científicos, dotados de recursos materiales apropiados (entradas), generan unos resultados (salidas) en forma de publicaciones o patentes; las políticas de estimulación y los servicios científico-técnicos retroalimentan al sistema aumentando su eficacia. El resultado final es conocimiento e innovación, cuya eventual incorporación al sistema productivo puede dar lugar a un aumento de la competitividad y crecimiento económico que retroalimenta al sistema.

disposición a cultivar las distintas ramas del árbol de la ciencia, el CSIC representa el primer intento de organizar la investigación técnica e integrarla dentro de lo que hoy conocemos como sistema ciencia-técnica-industria, a través del patronato "Juan de la Cierva".

A partir de 1953, los cambios sociopolíticos originados por el desenlace de la segunda guerra mundial y la alianza con Estados Unidos para el establecimiento de bases militares norteamericanas en el territorio español, se realizan una serie de acciones (créditos, destinados a infraestructuras, del Banco Mundial y de la norteamericana Fundación Nacional para la Ciencia, programa de becas para formación de personal investigador, contratos de investigación de empresas estadounidenses con centros de investigación españoles) que van a suponer un impulso para el desarrollo del sistema de ciencia y técnica. Desde el punto de vista institucional, el hito más importante de este período corresponde a la creación en 1961 de la Comisión Asesora de Investigación Científica (CAICYT), que queda adscrita a la Presidencia de Gobierno, como instrumento para fomentar la I+D en el contexto de los Planes de Desarrollo; un esbozo anticipado de lo que luego habría de ser el Programa Técnica-Economía de la OCDE. La CAICYT gestiona a partir de 1965 los Fondos Nacionales para el Desarrollo de la Investigación Científica, que se distribuyen entre subvenciones a proyectos de investigación básica y aplicada, infraestructura y acciones concertadas de investigación y desarrollo. Sin embargo, la cuantía de estos fondos es modesta. Hasta 1975 no se superan los mil millones de pesetas corrientes.

En 1977 se creó el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI), adscrito al Ministerio de Industria y constituido inicialmente con un crédito del Banco Internacional de Reconstrucción y Desarrollo para estimular la investigación técnica industrial. Establecido cinco años antes, en este período se consolida el Fondo de Investigaciones

Sanitarias (FIS), adscrito al Ministerio de Sanidad, como instrumento para promover la investigación y desarrollo en temas de salud, utilizando una contribución de las empresas farmacéuticas (descuento complementario) que se benefician del gran mercado institucional que supone el sistema nacional de salud. Desde el punto de vista de las actividades relacionadas con la investigación básica, hay que destacar el cambio de tendencia en la presencia de las publicaciones científicas españolas en las bases de datos internacionales; desde 1979 se aprecia un crecimiento lineal que supone la incorporación de unas 600 nuevas publicaciones cada año.



3. LA EVOLUCION del Fondo Nacional y de la financiación procedente del extranjero puntúa las principales etapas de la reciente historia del SCT español (Fuentes: CAICYT, CICYT)

En la década de los ochenta se asiste a un crecimiento notable del Fondo Nacional para el Desarrollo de la Investigación que se complementa, tras el ingreso en la Comunidad Europea, con la entrada de fondos de investigación desde el extranjero —formalmente retornos de las aportaciones españolas— equivalentes en cuantía a los del Fondo Nacional. Desgraciadamente, esta bonanza parece asociada a una etapa expansiva de la economía española, de forma que el crecimiento del esfuerzo en I+D se estanca a partir de 1990, coincidiendo con la recesión económica. Además de los compromisos económicos estatales para la financiación de la I+D, se producen en este período cambios en el marco institucional del SCT debido al desarrollo de las competencias autonómicas en investigación y la promulgación de la Ley de Reforma Universitaria de 1983 y la Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica en 1986.

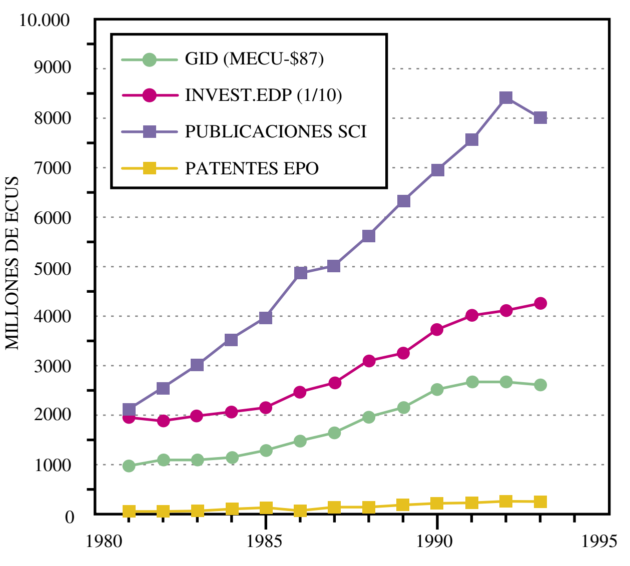
La asunción de las competencias de fomento de la investigación por las comunidades autónomas es un proceso desigual y todavía inconcluso en el que destacan Andalucía, Asturias, Cataluña, Galicia, Madrid, Navarra, Comunidad Valenciana y País Vasco, por disponer de una elaborada normativa específica y planes regionales de investigación. Cataluña, por ejemplo, se dota ya en 1980 de un organismo de planificación y coordinación interdepartamental (CIRIT). Además, su estatuto de autonomía tensó al máximo la dualidad constitucional en la distribución de competencias sobre fomento de la investigación entre comunidades autónomas y el estado, al atribuirse unas competencias exclusivas que la Constitución reserva para el estado.

El Tribunal Constitucional, en sentencia de 1992, sitúa al sistema de I+D español en la perspectiva de un modelo de concertación concurrente como el existente en Alemania. Esto puede resultar más complicado que un sistema centralizado, pero no necesariamente más ineficaz. Sobre todo si se acompaña de medidas para facilitar la convergencia de las regiones menos desarrolladas.

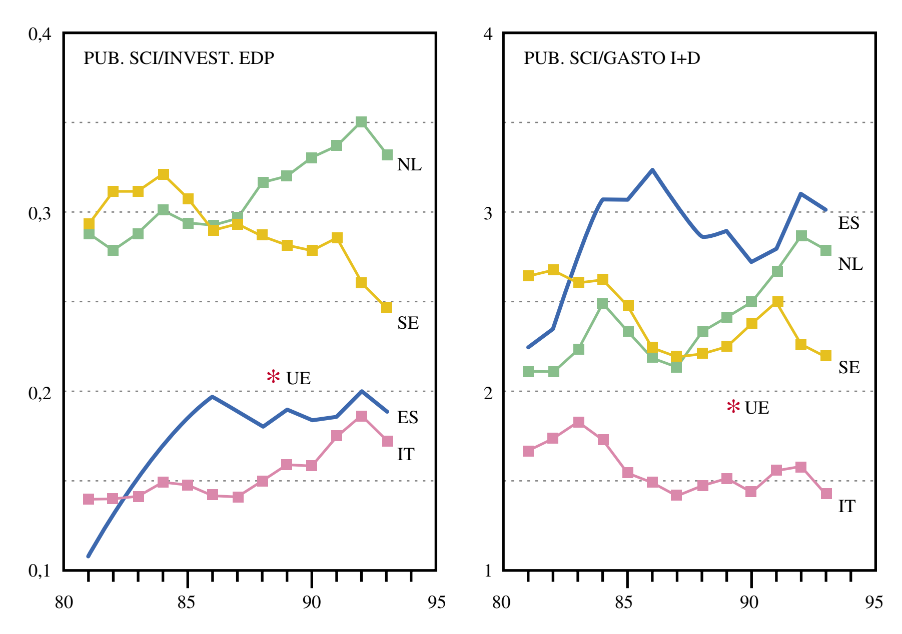
La Ley de Reforma Universitaria (LRU) incide en varios aspectos sobre la organización y funcionalidad del SCT. Por una parte consagra la figura del profesional docente-investigador, con un peso importante de la actividad científica en el acceso, promoción y complementos retributivos. La LRU establece también la autonomía y descentralización de las universidades, que pasan a engrosar los efectivos de I+D regionalizados. Además, la masificación de la enseñanza ha facilitado un crecimiento notable de las plantillas docentes que tiene consecuencias estadísticas sobre los indicadores de I+D.

Finalmente, la Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica (coloquialmente llamada "ley de la ciencia") establece un nuevo marco institucional para desarrollar las iniciativas estatales de promoción del sistema de I+D, coordinar esfuerzos de las distintas administraciones y reorganizar el sector público de ciencia y técnica (OPI). El instrumento principal para estas acciones es el Plan Nacional de I+D (PNID), a cuyo frente se dispone una Comisión Interministerial de Ciencia y Técnica (CICYT) garante de la coordinación sectorial, una Comisión Permanente y una Secretaría General para la gestión de los programas. Además, se crea un Consejo Asesor para promover la participación de los agentes económicos y sociales y un Consejo General, para la participación y coordinación de las comunidades autónomas.

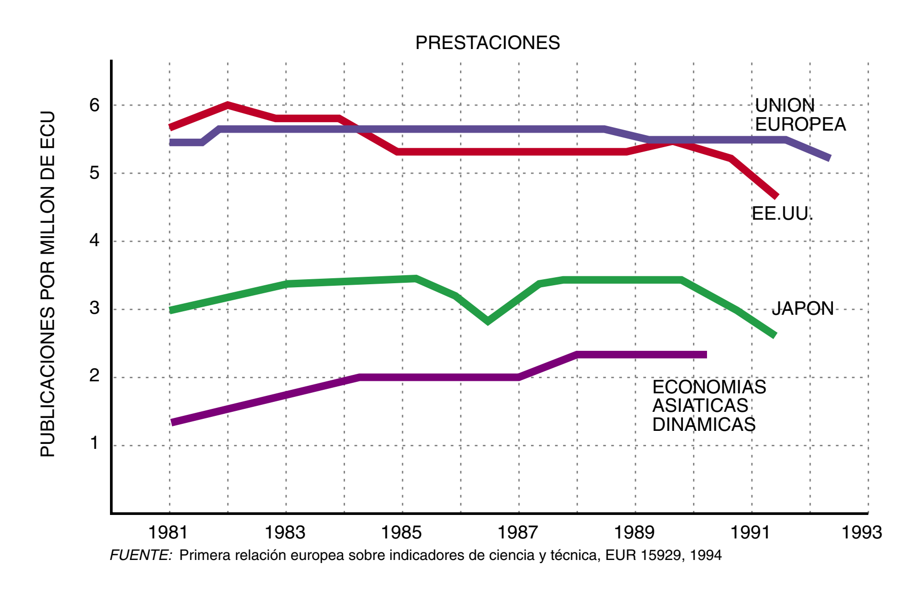
Sobre el trasfondo de ese entramado administrativo y



4. EVOLUCION del sistema I+D español en el período 1981-1993 (Fuente: ERSTI)



5. PRODUCTIVIDAD CIENTIFICA. Número de publicaciones en el SCI referidas al número total de investigadores en equivalente de jornada completa (EDP) y a los gastos totales en I+D (GID) en millones de ecus constantes. (Fuente: ERSTI)



financiero, el sistema español de ciencia y técnica ha experimentado en los últimos años unos cambios cuya amplitud y alcance nos proponemos revisar, atendiendo a una serie de criterios cuantitativos y cualitativos que agrupamos en torno a los epígrafes de crecimiento, productividad, articulación ciencia/técnica, convergencia europea y cohesión regional.

Desde el punto de vista cuantitativo, la característica dominante de este período puede resumirse en crecimiento: incremento del gasto en I+D (GID) que multiplica 2,8 veces su valor en moneda constante (millones de ecus referidos a dólares de 1987), si bien hay que destacar que la mayor parte de este cambio se concentra en el quinquenio 1985-1990, que corresponde al período expansivo de la economía española. Crecimiento paralelo de los investigadores en equivalente de dedicación plena (EDP), que pasan de una cifra cercana a 20.000, en 1981, a más de 40.000, en 1993. Crecimiento también de las publicaciones de autoría española en la base de datos SCI que cuadruplican los valores de 1981, si bien el crecimiento lineal de este parámetro se inicia a finales de la década precedente. Por último, las patentes de procedencia española registradas en las oficinas internacionales triplican su valor inicial, aunque no rebasan la cifra de 175 y 250 en las oficinas de patentes estadounidense y europea, respectivamente.

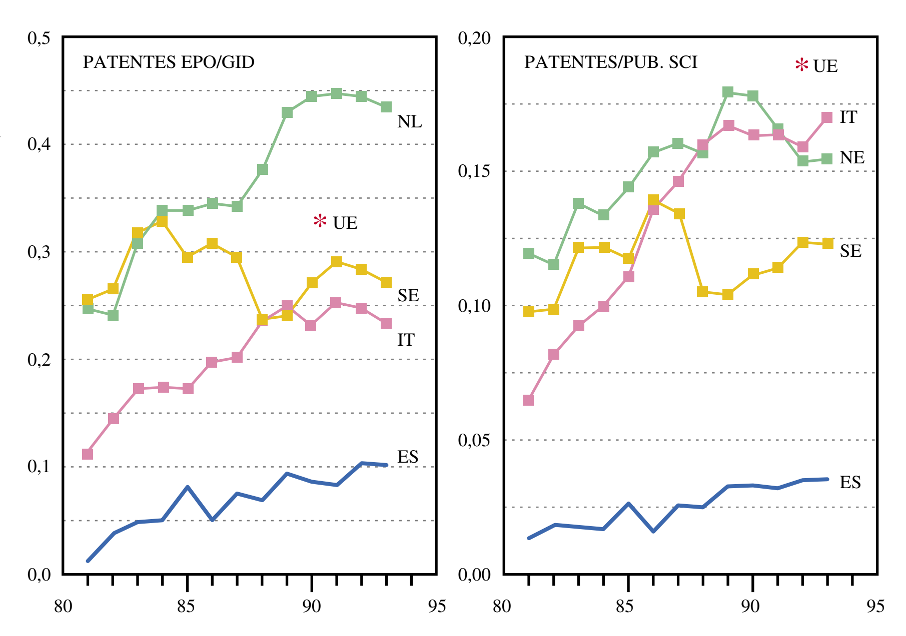
Más allá de estos cambios cuantitativos, la eficiencia del sistema español de I+D viene determinada por su capacidad para la conversión de los recursos puestos a su disposición en conocimiento científico y técnico. Para evaluar ese rendimiento podemos recurrir a los indicadores de productividad; entre éstos, el cociente entre resultados (publicaciones o patentes) y recursos empeñados (investigadores o gasto de I+D), siempre y cuando se disponga de series temporales o comparadores internacionales de referencia. Para este estudio hemos utilizado los datos del informe ERSTI, referentes a España y tres países (Italia, Países Bajos y Suecia) con sistemas de I+D de rango medio alrededor del español.

La producción científica española por investigador se duplicó entre 1980 y 1986, manteniéndose desde entonces en torno a las 0,2 publicaciones SCI por investigador en dedicación plena; una cifra similar al valor medio vigente en 1989 para el conjunto de la Unión Europea y algo superior a la productividad de Italia. La productividad por investigador es notablemente superior en Holanda y Suecia, aunque con una evolución divergente, creciente en aquélla y descendente en ésta. En el caso de la producción científica relativa al gasto de I+D la situación es algo diferente. Así, la productividad española se sitúa desde 1985 en torno a las 3 publicaciones SCI por millón de ecus gastados, cifra que dobla la media italiana en el período considerado y que supera en más del 50 % a la media de la Unión Europea en 1989. También, aunque a menor distancia, supera la productividad de Suecia y Holanda, aunque esta última experimenta un repunte que la aproxima a los valores españoles de comienzos de los noventa. Tomados en su conjunto, estos dos indicadores sitúan a la productividad científica española a un nivel igual o superior a la media de los países comunitarios, por lo que puede afirmarse que, a este nivel (publicaciones en el SCI), no tenemos problema alguno de convergencia.

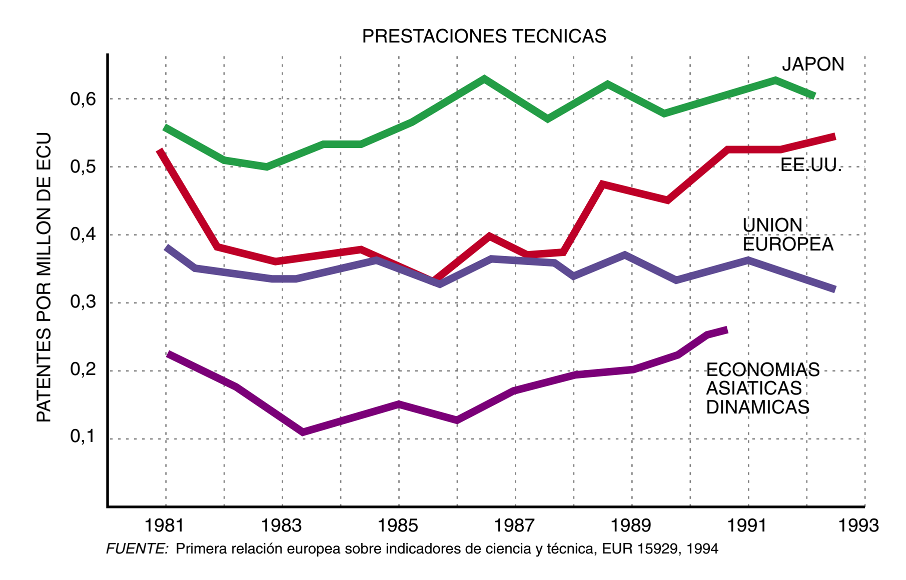
Antes de dejar este tema conviene señalar dos aspectos que hacen referencia a la evolución temporal de la productividad científica española y su posición relativa en el contexto europeo. En primer lugar se aprecia que los principales cambios en la producción científica han tenido lugar en el período anterior a 1986, con estancamiento en el

período subsiguiente, lo que sugiere que los cambios institucionales y las políticas adoptadas desde 1986 no se han traducido en una mayor eficiencia del sistema de I+D, al menos en lo referente a las publicaciones científicas. Por otra parte, llama también la atención el cambio drástico que se aprecia en la productividad científica española respecto a la europea, según se mida en relación al número de investigadores o al gasto de I+D. España ha gastado en los últimos diez años entre 60.000 y 70.000 ecus por investigador, en tanto que la media europea fue de unos 120.000 ecus.

Por lo que a la productividad técnica se refiere, el valor español de ese parámetro es tres veces inferior a la media de la Unión Europea. Invierte ésta unos tres millones de ecus por patente registrada, mientras que España ha de abonar más de 10 millones de ecus por situar una patente en la oficina europea. Destaca el óptimo rendimiento de Holanda en la producción técnica, que supera en cuatro veces y media a la española. Italia, en línea ascendente, y Suecia, tendente al estancamiento, se sitúan en cifras próximas a la productividad media europea. Las diferencias entre la productividad científica y técnica del SCT español quedan aún más de manifiesto al comparar las razones de patentes registradas a publicaciones internacionales, 6 veces inferior por término medio a las vigentes en la Unión Europea, en la que se registra 1 patente por cada 5 artículos censados en el SCI, frente a los más de 30 artículos por patente registrada que se dan en España. Las diferencias con Italia y Holanda son palmarias y crecientes, por la tendencia en estos países a producir relativamente más patentes que publicaciones.

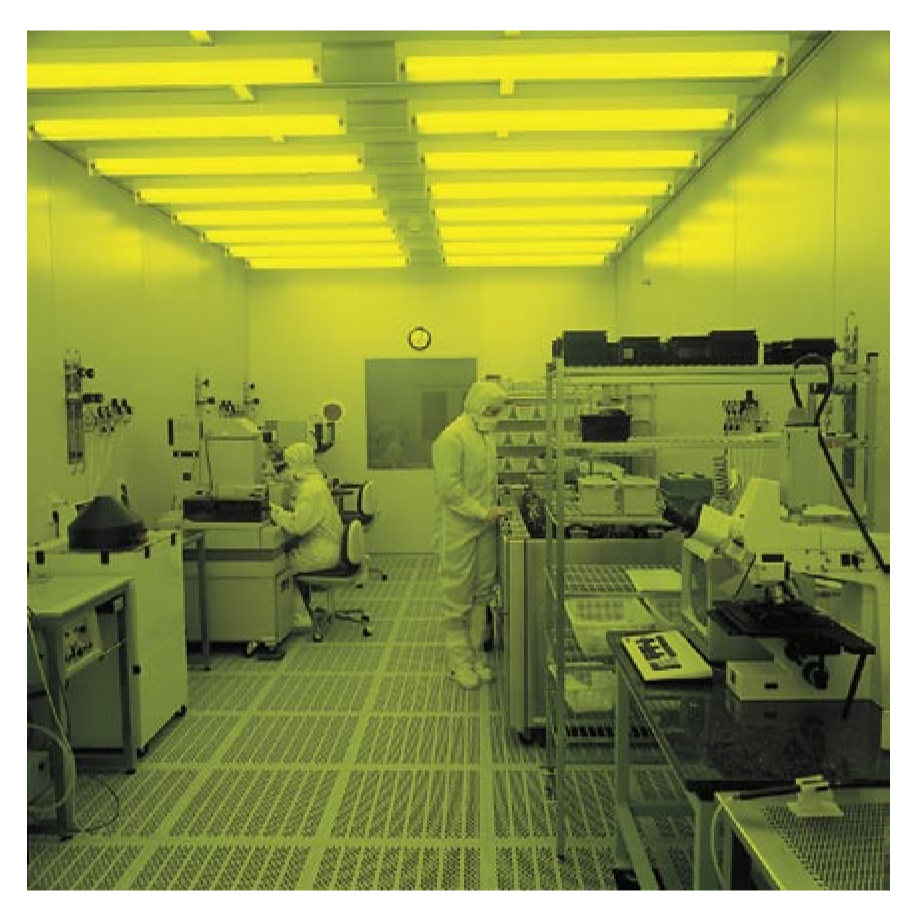


6. PRODUCTIVIDAD técnica y articulación de I+D. La productividad técnica se indica por el cociente entre el número de patentes registradas en la oficina europea (EPO) y el gasto en I+D. La articulación se expresa por el cociente entre publicaciones SCI y las patentes EPO.



La disparidad y divergencia entre la productividad de publicaciones y patentes sugiere que el sistema español de ciencia y técnica adolece de una defectuosa articulación entre las actividades de investigación básica y las de desarrollo técnico, con predominio de la I sobre la D en el binomio I+D. Esta impresión se refuerza al considerar la evolución de algunos indicadores de desarrollo técnico e industrial tales como la balanza técnica, con unas exportaciones que apenas cubren la cuarta parte de las importaciones, y una creciente penetración de patentes extranjeras, cuya solicitudes superan ya en más de 20 veces las efectuadas por españoles. Y eso a pesar de las políticas de estimulación de la I+D empresarial, manifiestas a partir de 1985 por un notable aumento de las transferencias al sector empresarial procedentes del sector público español y extranjero (programas marco y otras acciones europeas), que pasan a representar en torno al 15 % del gasto en I+D empresarial.

Aunque el concepto de convergencia surge del tratado de Maastricht como referente económico, es propósito explícito de la Unión Europea el superar las diferencias existentes entre los SCT de los países miembro y mejorar el potencial científico-técnico de los mismos de cara a la competitividad internacional. Con el fin de establecer objetivos concretos de convergencia y precisar la distancia a recorrer, conviene disponer de un juego de indicadores y un punto de referencia, para el que se ha adoptado el valor medio de los 12 países integrantes de la Unión Europea. Para facilitar la comparación entre los diferentes indicadores se calcula la razón entre los valores del país considerado y los de referencia, de forma que el objetivo de convergencia para cada indicador es igual a la unidad. En el caso español, el juego de indicadores muestra un grado suficiente de convergencia sólo en el caso de la productividad científica. La convergencia es baja en el caso de los indicadores de esfuerzo en I+D (en porcentaje del producto interior bruto) y personal de I+D por 1000 activos. Por último, la convergencia es muy baja en indicadores de acti-



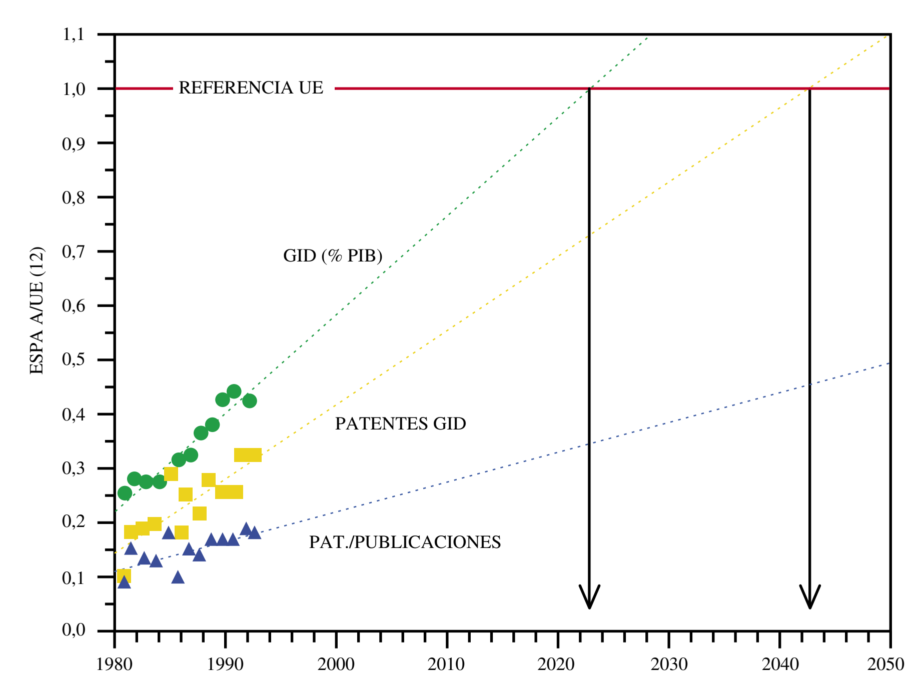
7. VISTA DE LA SALA BLANCA del Centro Nacional de Microelectrónica en sus instalaciones de Bellaterra-Barcelona, dependiente del CSIC.

vidad de carácter técnico (proporción de patentes a publicaciones, balanza técnica, autosuficiencia de patentes y personal I+D del sector empresarial por 1000 activos).

Si representamos los cocientes de varios indicadores significativos entre España y la Unión Europea, a lo largo del período 1981-1993, de forma que el cruce de las líneas de regresión con el valor 1 de los ratios permita situar la fecha probable de convergencia, siempre que se mantengan las condiciones dominantes en el período considerado, observaremos que el gasto español en I+D podría alcanzar la media europea hacia el año 2020, a condición de que se recuperaran los ritmos de crecimiento alcanzados en el quinquenio 85-90, que es el que marca la tendencia. A su vez, la previsible convergencia en el indicador de productividad técnica (patentes/inversión en I+D) se situaría veinte años más tarde, hacia el 2040. Finalmente, el indicador de articulación I+D (patentes/publicaciones) no alcanzaría el valor actual de la Unión Europea hasta mediado el siglo xxii.

Además de la convergencia de los sistemas de ciencia y técnica entre los países miembros de la Unión Europea, la política comunitaria y el desarrollo del estado de las autonomías español establecen la necesidad de acometer políticas de cohesión encaminadas a reducir las diferencias regionales en I+D. El problema a afrontar es considerable a la vista del abanico de situaciones. Madrid, por ejemplo, destaca en solitario con un desarrollo científico-técnico superior a la media europea. Le siguen, aunque a considerable distancia, País Vasco, Cataluña y Navarra, cuyos indicadores de esfuerzo se sitúan en torno a la media española. País Vasco y Cataluña sobresalen, además, por el peso de la I+D empresarial, que representa un 70 y 60 por ciento, respectivamente, del total del esfuerzo en I+D de dichas comunidades autónomas. El resto de las comunidades se sitúa por debajo de la media española en un amplio despliegue que encabezan Castilla y León y Aragón y que cierran Castilla-La Mancha y Baleares.

Las razones para este desequilibrio regional son múltiples, aunque resumibles en última instancia en el efecto de capitalidad (centralismo madrileño, incluyendo los centros públicos dependientes de la administración central), el distinto peso de las instituciones académicas (alto en Castilla y León o Andalucía, bajo en Extremadura, Baleares o Castilla-La Mancha) y el diferente dinamismo industrial (alto en el País Vasco, Cataluña, Navarra) junto al tipo de actividad económica dominante



8. PREDICCION de la convergencia con Europa basada en las tendencias del período 1981-1992 (Fuente: ERSTI).

(servicios en Baleares y Canarias). Como múltiples también habrán de ser las políticas de promoción de la I+D a ejecutar y los ritmos de aproximación.

En el pasado que estamos analizando, la combinación de políticas redistributivas desde la administración central junto con políticas de estimulación desarrolladas en las administraciones autonómicas han permitido un crecimiento diferencial modesto de Castilla y León, Comunidad Valenciana, Andalucía, Canarias, Galicia, Cataluña y Navarra, junto con una disminución relativa del peso del País Vasco y Madrid; siendo esta última más acusada, en justa correspondencia a su hegemonía.

En resumen, la historia reciente del sistema español de ciencia y técnica muestra la existencia de tres etapas de institucionalización, con especial incidencia en el desarrollo de la investigación de carácter básico, que está alcanzando unos niveles competitivos a escala internacional. Por el contrario, la investigación encaminada al desarrollo técnico e inventiva carece de impulso de despegue, de forma que aparece notablemente estancada con respecto a la evolución de la Unión Europea. Desde esta perspectiva, el reto más importante a afrontar es el de la articulación del SCT, que está asociado al desarrollo de la I+D empresarial, la cual, a su vez, depende estrechamente de políticas de fomento de industrias y servicios de alto contenido técnico. A lo largo de este recorrido deben encontrar solución los problemas de cohesión interregional y convergencia europea que hemos considerado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL SISTEMA ESPAÑOL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. (Proyecto EPOC, dirigido por M. Quintanilla.) *Arbor*, febrero-marzo, 1992.

EL SISTEMA ESPAÑOL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN EL MARCO INTERNACIONAL. A. Lafuente y L. A. Oró. Secretaría General del Plan Nacional I+D, Fundesco, Madrid, 1992.

PROMOCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN Y ESTÍMULO A LOS INVESTIGADORES EN ESPAÑA. A. Pestaña, en *Interciencia*, vol. 17, n.º 6, páginas 338-343, Caracas, 1992.

THE EUROPEAN REPORT OF SCIENCE AND TECHNOLOGY INDICATORS 1994. (Report EUR 15897 EN.) Comisión Europea, DG XII, Bruselas, 1994.

Del azar benigno al azar salvaje

La noción de azar que utilizan las ciencias es multiforme. Su forma "benigna" no sirve para describir muchos fenómenos naturales. Para comprender la irregularidad hay que recurrir a sus formas "salvajes"

Benoît Mandelbrot

La gama de fenómenos naturales y sociales es infinita; las técnicas matemáticas susceptibles de domeñarlas, muy poco numerosas. Ocurre así que fenómenos que nada tienen en común comparten una misma estructura matemática. Esta conclusión filosófica se impuso a mi entendimiento hace treinta años. Mis trabajos sobre la Bolsa estaban próximos a su fin y yo atisbaba estructuras aleatorias muy parecidas en los trabajos que sobre ruidos y sobre turbulencia estaba iniciando entonces. En todos estos casos se trataba de los primeros estadios de la construcción de una geometría fractal.

¿Cuál era, pues, la idea central de mis trabajos sobre finanzas? La idea ambiental, si nos atrevemos a llamarla así, consistía en que los precios son funciones continuas del tiempo y que sus fluctuaciones no son más bruscas que las descritas por la muy clásica distribución de Gauss. El azar al que estas teorías hacían referencia puede muy legítimamente ser calificado de "benigno". Pero el examen de los hechos mostraba lo contrario: funciones discontinuas y fluctuaciones muy bruscas. Pronto hube de concluir que se trataba de una forma de azar muy distinta, que con toda legitimidad podríamos calificar de "salvaje". Me ocuparé aquí de algunas cuestiones filosóficas subyacentes a este enfoque.

BENOÎT MANDELBROT, de familia judía lituana, se formó en la Escuela Politécnica de París. Se trasladó a los Estados Unidos para trabajar en la empresa IBM. Ha dado clases en las universidades de Harvard y Yale, entre otros centros superiores. A él se le debe el término fractal y el desarrollo de la teoría geométrica correspondiente.

Para el profano y para el filósofo la noción de azar es una noción unívoca, cuya unicidad ha quedado además expresada matemáticamente de forma abstracta y muy general. Incluso con demasiada generalidad, como vamos a ver, tanto porque hace tabla rasa de diferencias fundamentales como porque la cimentación que la axiomática proporciona al cálculo de probabilidades diluye su especificidad. La teoría de la probabilidad constituye, de hecho, un capítulo mal diferenciado de la teoría de la medida.

Unificación, abstracción y generalidad han sido las tendencias que han dominando la investigación en el tercer cuarto de este siglo. La matemática francesa no fijaba su interés en las "filigranas" del análisis o de la geometría, sino en sus "estructuras fundamentales". La física se complacía en la búsqueda de partículas fundamentales con el mismo espíritu.

Cierto es que no hay ciencia sino de lo general. Mi dilatada carrera científica ha estado marcada por la identificación y el estudio de una nueva estructura general subyacente a numerosos fenómenos de apariencia heteróclita, estructura que se difunde por las matemáticas y por las ciencias físicas, biológicas y sociales, y que no es otra que la sibisemejanza o, dicho de modo más general, la invariancia por reducción o dilatación; los objetos que caracteriza son los fractales.

Sin embargo, y quizá paradójicamente, la construcción de la geometría fractal me hizo descubrir pronto, y luego me confirmó repetidamente, que la unicidad del mundo de los modelos aleatorios, e incluso la del cálculo de probabilidades, son engañosas. Desde el punto de vista que me interesa, el cálculo de probabilidades ofrece analogías cada vez más inquietantes con la teoría de la materia. La aplicación de leyes generales a contextos heteróclitos revela la existencia de varios "estados" muy distintos. Dos de los estados de la materia han sido conocidos desde siempre; las palabras "sólido" y "líquido" proceden del griego y del latín; "gaseoso" data del siglo XVII. La física es a la vez una y diversa. Manifestación de su unidad es que todos estos estados (y otros posibles, pues se están identificando sin cesar estados nuevos) se deduzcan de unos mismos principios y utilicen unos mismos conceptos, como los de temperatura y presión. Manifestación de su variedad es que los estados de la materia se diferencien de forma muy clara.

He vivido un fenómeno análogo de "diferenciación" en el caso del cálculo de probabilidades. Mi concepción actual del azar le permite adoptar diversos "estados", tan distintos entre sí como lo es un gas de un sólido. Para facilitar su comprensión lo mejor será que reconstruyamos la historia.

Para empezar sopesemos una afirmación que encontramos en la primera página de un tratado famoso, uno de cuyos coautores, Andrei Kolmogoroff, ha sido uno de los matemáticos más ilustres del siglo XX. Fue Kolmogoroff quien aportó a la axiomática del cálculo de probabilidades los últimos toques que la hicieron aceptable para los matemáticos "puros". Ahora bien, el prefacio que Gnedenko y Kolmogoroff escribieron en 1954 declara que "todo el valor epistemológico de la teoría de probabilidades se basa en esto: los fenómenos aleatorios, considerados en su acción colectiva a gran escala, crean una regularidad no aleatoria". El modelo subyacente corresponde al de una sucesión de números obtenidos por lanzamiento de un dado: la proporción de "doses" es muy variable (fenómeno aleatorio) en diez lanza-

mientos, pero será muy cercana a 1/6 (regularidad no aleatoria) en un gran número de tiradas (a gran escala). Volveremos sobre este asunto. Estoy seguro de que una encuesta entre matemáticos y científicos experimentales mostraría su plena conformidad con la tesis enunciada por Gnedenko y Kolmogoroff. Por desgracia la tesis es ambigua. Su generalizada aceptación es no pocas veces reflejo de un malentendido cuyas consecuencias, muy serias, vivimos a diario.

Precisemos: lo que la tesis antedicha significa para cualquier matemático es que toda acción colectiva posee al menos un aspecto que es, en el límite, regular y no aleatorio. Esto no basta para satisfacer al científico o al ingeniero: ambos tienen que asegurarse de que tal regularidad colectiva y no aleatoria no se refiera a fenómenos que no les interesen. Además, si existe regularidad, quieren asegurarse de que queda establecida con la rapidez suficiente para que los valores asintóticos sean reflejo de la estructura de los sistemas finitos que encontramos en la naturaleza.

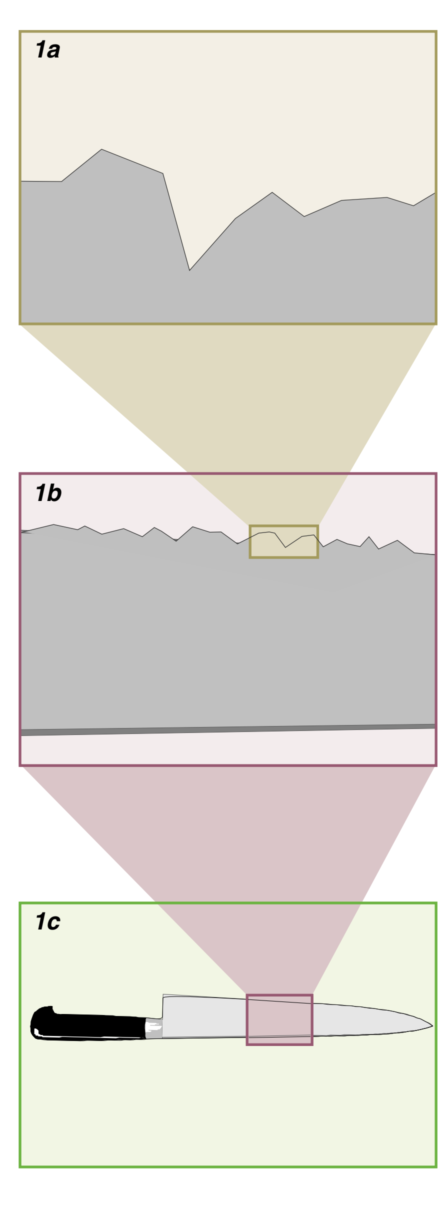
Al filo de la navaja

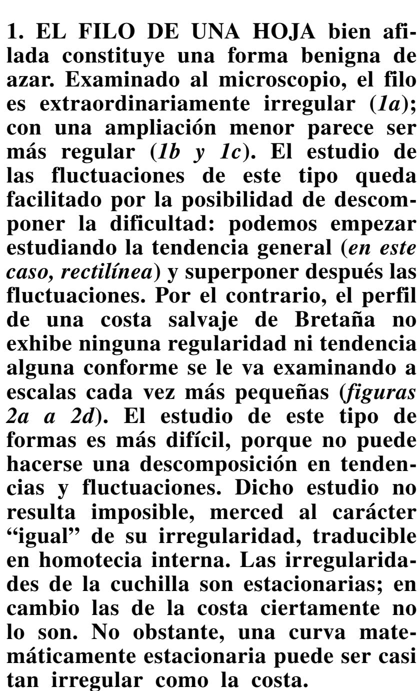
Sigamos precisando. La modalidad clásica del azar es la correspondiente al dado: cuando el número de observaciones ha aumentado lo suficiente, o cuando la precisión del análisis se torna suficientemente burda, las fluctuaciones aleatorias se neutralizan y muy pronto resultan relativamente insignificantes.

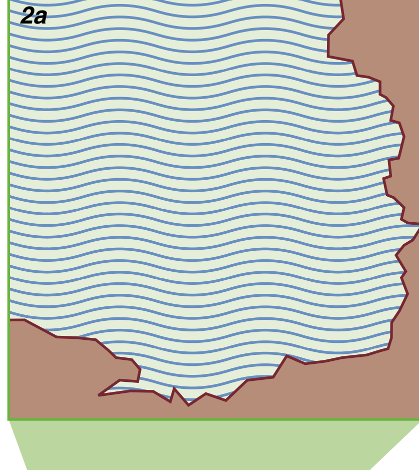
La vida ordinaria nos proporciona el ejemplo del filo de una navaja bien afilada: aunque a simple vista parezca perfectamente recto, ofrece un aspecto en extremo irregular al microscopio. La dirección del filo puede obtenerse sin problemas por extrapolación a partir de cualquier trozo cuyo tamaño sea mayor que las irregularidades, aunque sea menor que el todo.

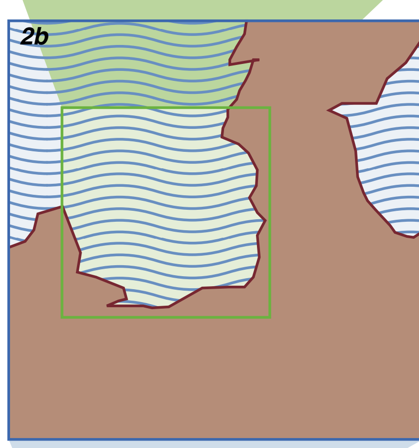
Examinemos también la corriente eléctrica que atraviesa un hilo conductor de cobre. Si se la amplifica mucho y se la aplica a los terminales de un altavoz, se nos presenta afectada de un "ruido térmico" muy audible. Y, sin embargo, un amperímetro ordinario indica una intensidad bien definida, que no se tarda mucho en medir exactamente; la causa es que el hilo se encuentra en perfecto equilibrio termodinámico.

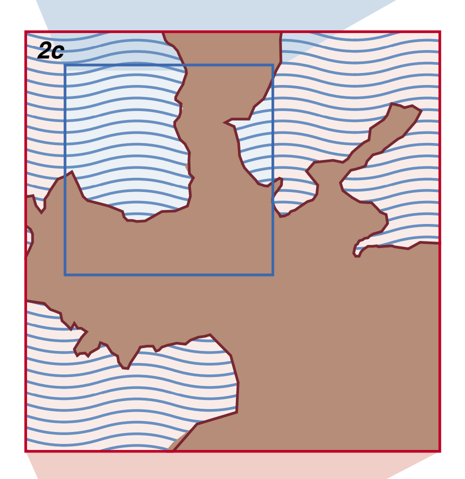
En el estudio de los ruidos térmicos suelen intervenir dos términos: la distribución gaussiana y el movimiento browniano. Con













1. EL FILO DE UNA HOJA bien afilada constituye una forma benigna de azar. Examinado al microscopio, el filo es extraordinariamente irregular (*1a*); con una ampliación menor parece ser más regular (*1b y 1c*). El estudio de las fluctuaciones de este tipo queda facilitado por la posibilidad de descomponer la dificultad: podemos empezar estudiando la tendencia general (*en este caso, rectilínea*) y superponer después las fluctuaciones. Por el contrario, el perfil de una costa salvaje de Bretaña no exhibe ninguna regularidad ni tendencia alguna conforme se le va examinando a escalas cada vez más pequeñas (*figuras 2a a 2d*). El estudio de este tipo de formas es más difícil, porque no puede hacerse una descomposición en tendencias y fluctuaciones. Dicho estudio no resulta imposible, merced al carácter "igual" de su irregularidad, traducible en homotecia interna. Las irregularidades de la cuchilla son estacionarias; en cambio las de la costa ciertamente no lo son. No obstante, una curva matemáticamente estacionaria puede ser casi tan irregular como la costa.

mayor generalidad, vamos a dar una definición cuantitiva de la noción de azar "cuasi-browniano", al que yo he calificado con el término vigoroso y colorista de "benigno".

Si digo que mis amigos estadísticos se limitan al estudio del azar benigno, no pretendo hacerles de menos: afrontar el azar siempre entraña dificultades, pero son de las que pertenecen a un registro limitado, que un trabajo intenso ha permitido dominar. Sabido es además que los físicos hace mucho que tienen la impresión de haber domeñado plenamente al azar, por la sencilla razón, a mi modo de ver, de que han podido y han sabido comenzar ocupándose de problemas en los que el azar era benigno y, por tanto, manejable. Cualquier ciencia en la que esto ocurra puede convertirse en ciencia exacta y en ella la afirmación de Gnedenko y Kolmogoroff adquirirá su sentido más estricto.

Mas todo el mundo conoce ciertos dominios del saber, aceptados y definidos desde hace tiempo, que se resisten a la cuantificación. Enseguida nos ocuparemos de tres de ellos. Uno concierne a la geografía, el segundo se refiere a la física, mientras que el más patente afecta a las fluctuaciones económicas y, muy en concreto, a las financieras. Estas últimas tienen como modelo la exactitud de la física estadística, pero lo menos que puede decirse es que tal modelo sigue siendo un ideal muy lejano. Volveremos sobre el tema.

Habiendo estudiado esta temática y algunas otras del mismo jaez, en 1964 me vi obligado a distinguir el azar benigno del que no lo es. El azar no benigno tiene dos causas. En primer lugar, puede ocurrir que ciertas magnitudes verifiquen cumplidamente la regularidad de Gnedenko y Kolmogoroff, pero que carezcan de interés, mientras que las magnitudes importantes experimenten fluctuaciones que no sean benignas. En segundo lugar, puede que haya convergencia hacia la regularidad no aleatoria, pero que sea extraordinariamente lenta.

De la costa de Bretaña a la Bolsa

Apresurémonos a precisar mediante ejemplos estas consideraciones generales. El recuerdo de la hoja bien afilada podría llevar a pensar que el trazado de un recoveco de la costa de Bretaña se compusiera de irregularidades superpuestas a una "tendencia general", representable por un segmento rectilíneo. Sentimos la tentación de extrapolar esta tendencia a toda una línea, pero todos sabemos que tal extrapolación carecería de sentido. Cuando se examina una costa desde mayor altura, las irregularidades "locales" se vuelven despreciables, pero tenemos que afrontar nuevas irregularidades, digamos, "comarcales"; éstas, a su vez, se funden bajo irregularidades que podríamos calificar de "provinciales", y así sucesivamente. Aunque usásemos toda la Bretaña, ninguna extrapolación rectilínea de la dirección de la costa resultaría adecuada.

Nuestro segundo ejemplo de azar benigno se refiere al ruido térmico en un hilo de cobre. Hace treinta y cinco años encontraba yo numerosas situaciones equiparables no benignas; en las finanzas, para empezar, pero también en el estudio de las crecidas del Nilo, de la turbulencia de los fluidos y de diversos ruidos electrónicos de los que no se comprendía gran cosa y a los que, por tanto, se denominaba "anormales". Fue, por otra parte, la lógica interna de mi enfoque (que explicaré dentro de un instante) la que desvió mis trabajos de una "ciencia social" a una ciencia física. En el momento de emprenderlos, tales dominios me eran extraños; fueron investigadores conocidos míos quienes me pidieron auxilio. Todos ellos habían hecho gran acopio de datos y habían realizado grandes esfuerzos para describirlos e interpretarlos por los métodos aceptados. A falta de otras opciones, aplicaban, claro está, los métodos del azar benigno; sus esfuerzos concluyeron en manifiestos fracasos.

Volviendo a las fluctuaciones financieras, ¿dónde se encontrará el equilibrio económico que haga las veces del equilibrio termodinámico "normal"? Me convencí rápidamente de que la noción de equilibrio económico carece de contenido y de que, para describir la variación de precios, no basta con modificar el azar benigno incorporándole innovaciones de detalle. Llegué a la conclusión de que el azar benigno de la mecánica estadística no había supuesto más que un primer estadio del indeterminismo en las ciencias. Era, en consecuencia, indispensable ir más allá del caso benigno (sin modificar el cálculo de probabilidades), pasar a un "segundo estadio" del azar, al que ahora me refiero con otro término pintoresco y vigoroso: azar "salvaje" o brutal. Poco a poco me vi llevado a considerar estos dos azares, no ya como dos estadios sucesivos de un proceso histórico, sino como dos "estados" de características intrínsecamente diferentes.

En un contexto matemático, la idea del azar salvaje se remonta muy atrás, a 1853, habiéndose manifestado ya el temor que suscita en la dureza de una discusión que se produjo entre Cauchy y Bienaymé. El debate concluía, en sustancia, con una exclamación: "No habría calificativos para artesanos tales, que fabricasen instrumentos maculados por errores tan salvajes." La posible existencia de tales fenómenos fue clasificada enseguida como patológica y nadie esperaba encontrárselos en la realidad. Demos, empero, algunos ejemplos.

El más antiguo (y más conocido) está en la crónica de las crecidas anuales del Nilo. La inercia intelectual derivada del estudio de las fluctuaciones benignas asume tácitamente que las medias de las crecidas anuales del Nilo, tomadas sobre períodos sucesivos no demasiado cortos, deberían ser, a grandes rasgos, idénticas. Pero la parábola bíblica de José, hijo de Jacob, la de las "vacas gordas y las vacas flacas", indica, por el contrario, que las medias de dos períodos sucesivos de siete años fueron, al menos en una ocasión, muy diferentes. De acuerdo con datos más modernos y por lo tanto más comprobables, las medias tomadas sobre 17 y sobre 70 años tienden igualmente a separarse una de otra.

Otro ejemplo importante y menos conocido de lo que merecería: las fluctuaciones de intensidad de las corrientes eléctricas que atraviesan láminas metálicas finas, micrófonos de carbón, contactos, semiconductores y toda clase de componentes eléctricos. Si se las amplía mucho, se encuentran perturbadas por "ruidos eléctricos anormales", llamados en $1/f$ (porque la amplitud de cada señal es inversamente proporcional a su frecuencia). Si representamos estos ruidos y la crónica del Nilo sobre gráficos de dimensiones análogas, su aspecto resulta asombrosamente parecido, lo que sirve para subrayar que el contraste entre fluctuaciones benignas y salvajes no es cuestión de escala, sino de estructura.

Apresurémonos a tomar nota de que las distinciones entre "blanco" y "negro" tienen una molesta tendencia a consentir numerosos niveles intermedios de "gris". Y es así como entre los estados benigno y salvaje

pronto aparece una zona intermedia, donde cabe identificar un “tercer estado”. Existen, por ejemplo, situaciones intermedias entre el filo de la navaja y la costa de Bretaña, como las costas occidentales de las Américas, en las que tras las fluctuaciones se aprecia una dirección general. Tenemos un ejemplo matemático de tal convergencia tardía en la distribución *logarítmico-normal*, un lobo disfrazado de cordero. Este azar define un azar lento; conduce, a la larga, a la misma regularidad no aleatoria que el azar benigno, pero lo hace con una lentitud extraordinaria.

Quiero insistir en el hecho de que la introducción de distinciones entre diversos estados de azar constituye una aportación a las matemáticas, pero no las cambia; lo que modifica sobre todo es su interpretación. Distinguir tres estados diferentes del azar me resultó indispensable cuando traté de resolver problemas planteados por la naturaleza recurriendo a determinadas partes de las matemáticas existentes, haciéndolas descender de una generalidad abstracta e indiferenciada a una concreción muy estructurada.

Cómo cuantificar “benigno”, “salvaje” y “lento”

A tal fin veamos un esbozo de la historia de los teoremas de límite del cálculo de probabilidades. Se empezaba por lanzar J veces una moneda que puede caer por igual de cara o de cruz. Pronto se demostró que, cuando J aumenta, la distribución de caras podía simplificarse de una de las dos formas siguientes.

La frecuencia relativa de las veces que la moneda sale cara se acerca cada vez a más a 1/2. Este es el caso más sencillo de la “ley de los grandes números”. La diferencia ponderada entre la frecuencia relativa y 1/2 obedece a una distribución que se aproxima cada vez más a la distribución supuestamente “normal” de Gauss. Tenemos aquí el más sencillo de los “teoremas centrales límites”. Después, pasito a pasito, estos resultados fueron ampliando su dominio de influencia. Al principio conservaron su sentido inicial y llevaron a una visión del indeterminismo en la naturaleza asentado, como el templo de Lamartine, sobre tres “columnas vivas”:

A. La “ley de los grandes números” (también llamada a menudo “teorema ergódico”).

B. La “forma clásica del teorema central límite”. (Es necesario especificar “forma clásica” porque, como veremos, existen otras que se aplican a los casos salvajes.)

C. Y un tercer dato, que se propende a omitir por considerarlo evidente: incluso cuando los “lanzamientos de dados generalizados” no sean independientes, todo cuanto se refiera a un “futuro” suficientemente lejano viene a ser independiente de un “pasado” suficientemente distante.

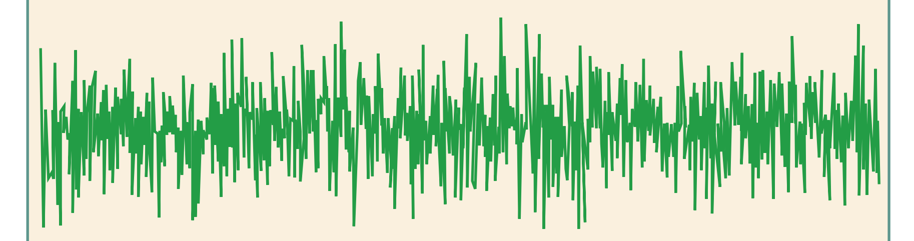
Estos teoremas se han representado en el recuadro 1. Todo cuanto sigue se refiere a su grado de validez. Debemos distinguir tres casos.

El caso benigno. Se puede dotar de un sentido preciso a la noción de que estos teoremas “se aplican rápidamente”. Si así ocurriera en el caso de una fluctuación, se la denominará “benigna”. Se deduce, en general, que las estructuras más interesantes no son estadísticas. Las fluctuaciones benignas han sido descritas por los matemáticos; muchas han sido explicadas por los científicos; los ingenieros han aprendido a manejarlas para volverlas más tolerables. Estos últimos podían evaluar la probabilidad de un acontecimiento futuro basándose en medias, calculadas sobre un número suficientemente grande de acontecimientos pasados.

El caso lento. Puede suceder que “la acción colectiva” conduzca a los teoremas A, B y C, pero que los límites se alcancen de un modo tan lento, que no enseñen gran cosa sobre el tema “colectivo” que encontramos en los problemas científicos concretos. ¿Qué decir entonces de los teoremas A, B y C? Resultaría tranquilizador saber que siguen siendo aplicables. Pero hay que reconocer que se trata de meros espejismos, pues el mundo real es finito. En una onda muy distinta, aunque paralela, el gran economista John Maynard Keynes se burlaba del afecto que sus colegas sentían por el largo plazo recordándoles que, “a largo plazo, todos muertos”.

¿Cuál es, pues, la aplicabilidad práctica de los teoremas de límite? La física macroscópica estudia muestras tan inmensas (el número de Avogadro es el patrón de medida) que no existe dificultad alguna. Pero consideremos,

1. Un ejemplo de azar benigno: el ruido térmico blanco



La teoría de las fluctuaciones benignas reposa sobre los siguientes pilares:

— La ley de los grandes números, también llamada teorema ergódico:

$$\frac{\sum_{t=1}^{T} X(t)}{T}$$ tiende hacia un límite no aleatorio, que se designa EX, MX o $\langle X \rangle$ según las disciplinas.

— El teorema central límite, llamado clásico o, más correctamente, “gaussiano en $\sqrt{T}$”:

$$\frac{\sum_{t=1}^{T} [X(t) - EX]}{\sqrt{T}}$$ tiende hacia un límite gaussiano.

El teorema límite central puede descomponerse en varias afirmaciones:

- $\dfrac{\sum_{t=1}^{T} [X(t) - EX]}{A(T)}$ posee límite
- Este límite tiene una distribución gaussiana.
- El coeficiente de ponderación es de la forma $A(T) = \sqrt{T}$.
- Por último, un pasado y un futuro suficientemente alejados son asintóticamente independientes.

en cambio, la variable logarítmico-normal, que es, sencillamente, la exponencial de una variable gaussiana. Sus propiedades a largo plazo están presididas por el hecho de que sus momentos (media, varianza, etc.) son todos finitos y se obtienen mediante fórmulas sencillas; ésta es la razón de que la variable logarítmico-normal parezca benigna. Pero a corto o medio plazo todo se desbarata y su comportamiento parece salvaje. Aunque se la trata como si no oliera a chamusquina, es un maravilloso (y peligroso) camaleón.

El caso salvaje. Los síntomas del fracaso completo de la modalidad benigna de la convergencia de las fluctuaciones son dos en número y pueden actuar solos o en combinación: (*a*) la aparición ocasional de enormes desviaciones con respecto a lo que hubiéramos querido considerar como "norma" y (*b*) el hallazgo ocasional de sucesiones muy largas de valores, cada una de las cuales se aparta poco de la norma, tomada por separado, pero cuyas desviaciones en una misma dirección son tan "persistentes" que la media no puede irse formando sino muy lentamente, o no se forma en absoluto. Por alusiones bíblicas de todos conocidas, he propuesto que los ejemplos asociados a estos dos síntomas se denominen "fluctuaciones de Noé" y "fluctuaciones de José", respectivamente. Buen número de sabios conocían ejemplos aislados de fluctuaciones de estos tipos, pero, precisamente porque los consideraban aislados, su existencia permanecía, por así decirlo, en secreto. Mis trabajos proclamaron su importancia y su unidad; el azar salvaje merece considerarse objeto de estudio por derecho propio.

Cabe también preguntarse por qué no se le ha aceptado como tal antes. Puede encontrarse una explicación en una opinión que he oído expresar muchas veces. Hela aquí: si no en teoría, sí por lo menos desde el "punto de vista práctico", basta con que una fluctuación sea "estacionaria", es decir, que obedezca a reglas que permanezcan constantes en el tiempo, para que los tres teoremas *A*, *B* y *C* sean aplicables. Si esto fuera cierto, una fluctuación a la que no se aplicasen los teoremas *A*, *B* y *C* no podría ser estacionaria.

Tomemos la evolución de las cotizaciones bursátiles, que nos dice cómo varía a lo largo del tiempo tal o cual valor. En cuanto se pudo disponer de suficientes datos, se comprobó que no hay indicio alguno de que los teoremas *A*, *B*, *C* sean aplicables.

2. Un ejemplo de azar salvaje: el proceso de Cauchy

Tomemos una sucesión de variables aleatorias independientes *X(t)*, cada una de las cuales tenga una densidad de probabilidad de Cauchy:

$$\frac{1}{\pi\ (1 + x^2)}$$

Estas variables tienen la propiedad de que su media,

$$EX = \frac{\sum_{t=1}^{T} X(t)}{T}$$

es también una variable de Cauchy. Tomar la media no tiene efecto alguno, ni resulta aplicable la ley de los grandes números. De hecho, la esperanza matemática es infinita, por lo que la expresión que interviene en el teorema central límite clásico no tiene sentido y el propio teorema no es utilizable sino bajo una forma "generalizada" que altera por completo su contenido. El fracaso de los teoremas habituales se debe en este caso a la presencia frecuente de valores enormemente grandes, ejemplos de las que he denominado "fluctuaciones de Noé."

Los defensores del "punto de vista práctico" sacaron la conclusión de que los ruidos anormales y los cambios de los precios no son estacionarios, es decir, que su mecanismo varía con el tiempo.

Tanto esta actitud como su persistencia me han sorprendido y afligido siempre. Sorprendido, porque los estadísticos que la defienden se resignan con demasiada facilidad a quedar en paro. Afligido, porque veía quintaesenciada esa actitud derrotista que pretende que el estudio de la economía debe contentarse con técnicas probabilísticas ya experimentadas por la física y con las que ésta nos ha familiarizado. Pero resulta que todas estas técnicas se refieren al azar benigno.

Es ahí donde se encuentra el origen de la tentadora idea de que las fluctuaciones se producen necesariamente en torno a una media, que puede interpretarse como punto de equilibrio y que experimenta diversos desplazamientos, o tendencias. Cuando sucede realmente así, la dificultad es descomponible: se procede primero sin tener en cuenta el azar y la incertidumbre no interviene sino en una segunda etapa, a modo de corrección. Es sabido que, en los casos benignos, tal proceder consigue éxitos clamorosos. Pero cuando las fluctuaciones no son benignas, si se confirmase que las fluctuaciones económicas pertenecen realmente a este tipo, cabe esperar que la noción de equilibrio económico se les "escurra por entre los dedos" a quienes deseen asirlo experimentalmente.

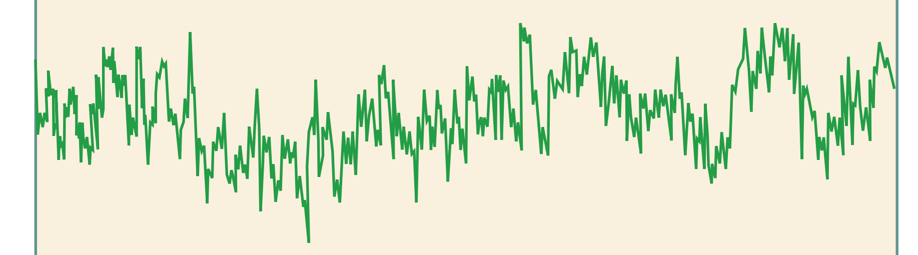
En el fondo, esta actitud derrotista parte de un error, a saber, de la idea, ya mentada, de que, a gran escala, lo aleatorio genera una regularidad que es, a todos los efectos, no aleatoria. No es en absoluto así y era cosa sabida en teoría de la probabilidad. Si los científicos no se esperaban el azar salvaje era porque los estudiosos de la probabilidad les habían camuflado tal "salvajismo", exagerándolo unas veces y minimizándolo otras. Quedó exagerado por quienes lo tildaron de "excepcional", de "patológico" y de carente de aplicación. Fue minimizado u ocultado por el movimiento en pro de la generalidad que caracterizaba a todas las ciencias hace treinta años. Lo que solía decirse no era que un teorema, ergódico o central límite tuviese fallos, sino que se decía que podía ser "generalizado", incluso sin cambiarle de nombre.

Pero la "generalización" no es una noción neutra. Llega un momento en que los contenidos de los teoremas centrales límites cambian muy profundamente, perdiendo la significación intuitiva de la que hasta entonces habían sacado partido. Es lamentable que la utilización de la misma palabra suscite la impresión de que la generalidad se obtiene, por así decirlo, a bajo costo y sin verdadero cambio.

Carácter creativo del azar salvaje

Mis trabajos han estado siempre dominados por el carácter fuertemente visual de todo mi pensamiento. Todo el mundo parece saber que es así en el caso del "conjunto de Mandelbrot". Pero la misma característica estaba ya presente en

3. Otro ejemplo de azar salvaje: el ruido en 1/*f*



Los ruidos en los que la amplitud de una frecuencia es inversamente proporcional a esta frecuencia, denominados ruidos en 1/*f*, poseen, al igual que los procesos de Cauchy, la propiedad de que "tomar la media" no tiene ningún efecto sobre ellos. No les son aplicables ni la ley de los grandes números ni el teorema central límite clásico.

El fracaso de los teoremas habituales se debe en este caso a la presencia de "ciclos" muy largos y muy lentos, ejemplos de lo que he denominado "fluctuaciones de José."

mis investigaciones sobre el azar y me ha enseñado una gran lección. Para enunciarla, comparemos diversos ruidos eléctricos y esa especie de ruidos de los mercados bursátiles que son los cambios de precios. Un ruido térmico, del que ya se ha dicho que es benigno, es un ruido monótono, sin carácter, que puede ser eliminado ("filtrado") con bastante facilidad. Por el contrario, un gráfico bursátil, un ruido en 1/*f* o cualquier otro ruido salvaje parecen estar cambiando de carácter sin cesar. Rebosan de características de las cuales se podría jurar que tienen cada una algún significado, que es imposible que sean fruto del puro azar. Y así es ciertamente si nos limitamos al azar habitual, vale decir, al azar benigno.

Por el contrario, he encontrado que estas peculiaridades pueden ser "muy fácilmente" efectos de un azar salvaje, observación que inicialmente sorprende. Fue en el contexto de la Bolsa donde tomé conciencia por vez primera de un fenómeno inquietante y magnífico: el azar puro puede tener un aspecto que no podemos negarnos a calificar de creativo. Cambio de tema para afirmar enseguida que es tal creatividad la que, diez años después, nos proporcionó los pseudorrelieves terrestres fractales, ahora clásicos ya, que se han repetido e imitado por doquier.

En vista de lo dicho, cómo no añadir que el azar benigno y el maligno difieren entre sí tanto como puedan diferenciarse un gas y un sólido. Que las reglas que los describan a nivel de máxima abstracción sean generales y comunes para ambos no obsta para que estos dos casos planteen cuestiones muy diferentes. La noción de "tratamiento", por seguir la analogía médica, ¿debe resignarse a tomar en estos dos casos formas totalmente diferentes?

Mencionaré aquí que, en lugar del calificativo salvaje, al principio había utilizado "maligno", tomándolo en dos sentidos nada diabólicos. En su sentido médico sugería problemas muy difíciles y para los cuales la noción de tratamiento o de cura no tenía la misma significación que en los casos benignos. El sentido no médico de "maligno" era igualmente sugestivo, pero dejémoslo de lado...

Ciencias y azares

Se comprueba que en todas las ciencias aparecen fluctuaciones no benignas. En las ciencias (por así decirlo) "menos exactas", se encuentra lo no benigno por doquier, mientras que en las "exactas" la regla parece ser que lo no benigno se concentra en los casos aislados. Los ruidos fundamentales de la física son los ruidos térmicos, que son benignos, mientras que los fenómenos no benignos son "casos especiales", a los que se gusta considerar carentes de importancia.

Entre las razones no contingentes de que dicha ciencia haya podido llegar a ser exacta debemos contar el hecho de que sus fluctuaciones más importantes resulten ser benignas. Por el contrario, las ciencias donde es el azar no benigno quien rige los ruidos de base corren el riesgo de permanecer largo tiempo en un estado "menos exacto". La opinión contraria está muy extendida. Postula que las ciencias exactas no han gozado más que de la ventaja accidental de haber tenido más tiempo para desarrollarse, pero este punto de vista me parece contrario a las lecciones de la historia. El problema de la previsión de las crecidas de los ríos y el de la previsión de las posiciones de los planetas se plantearon más o menos simultáneamente en la antigüedad en el seno de la física, pero mientras que el primero se mantuvo en el dominio de la superstición, se hicieron brillantes progresos en el segundo. Pero resulta que era éste el que tenía unas fluctuaciones débiles y, en el límite, despreciables.

Podría ser, pues, que ciertas ciencias fueran intrínsecamente más complejas que otras. Se podría temer que el "grado de exactitud" de una ciencia tuviera, en todos los casos, un límite más o menos alto. Al ir desde las más exactas a las que lo son menos, veríamos ir disminuyendo la proporción de magnitudes interesantes que son regularizadas por la acción colectiva, así como también la proporción de magnitudes regularizables que resultan ser interesantes.

Antes de tratar de resolver cualquier problema que se plantee, sería necesario que retomásemos y profundizásemos en la noción de "problema bien planteado", formulada hacia 1900 por Jacques Hadamard. Mientras estudiaba diversas ecuaciones de la mecánica, percibió con sorpresa que los efectos de pequeñas variaciones de los datos iniciales no eran siempre limitados, sino que, por el contrario, había casos en que eran considerables. Cuando es así, puede que la "relación de causa a efecto" se conozca perfectamente, sin que tenga nada de aleatorio, y que, sin embargo, resulte prácticamente inútil como método de predicción. Cuando tanto la relación de causa a efecto como las incertidumbres de los datos iniciales son ambas aleatorias, qué sea "bien planteado" suscita nuevos problemas. Pero no es éste el lugar para discutirlos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE. Benoît Mandelbrot. Nueva York, W. H. Freeman, 1982.

OBJETS FRACTALS. Benoît Mandelbrot, Flammarion; París, 1996.

FRACTALS, HASARDS ET TOURBILLONS. Benoît Mandelbrot, Flammarion; París (en prensa).

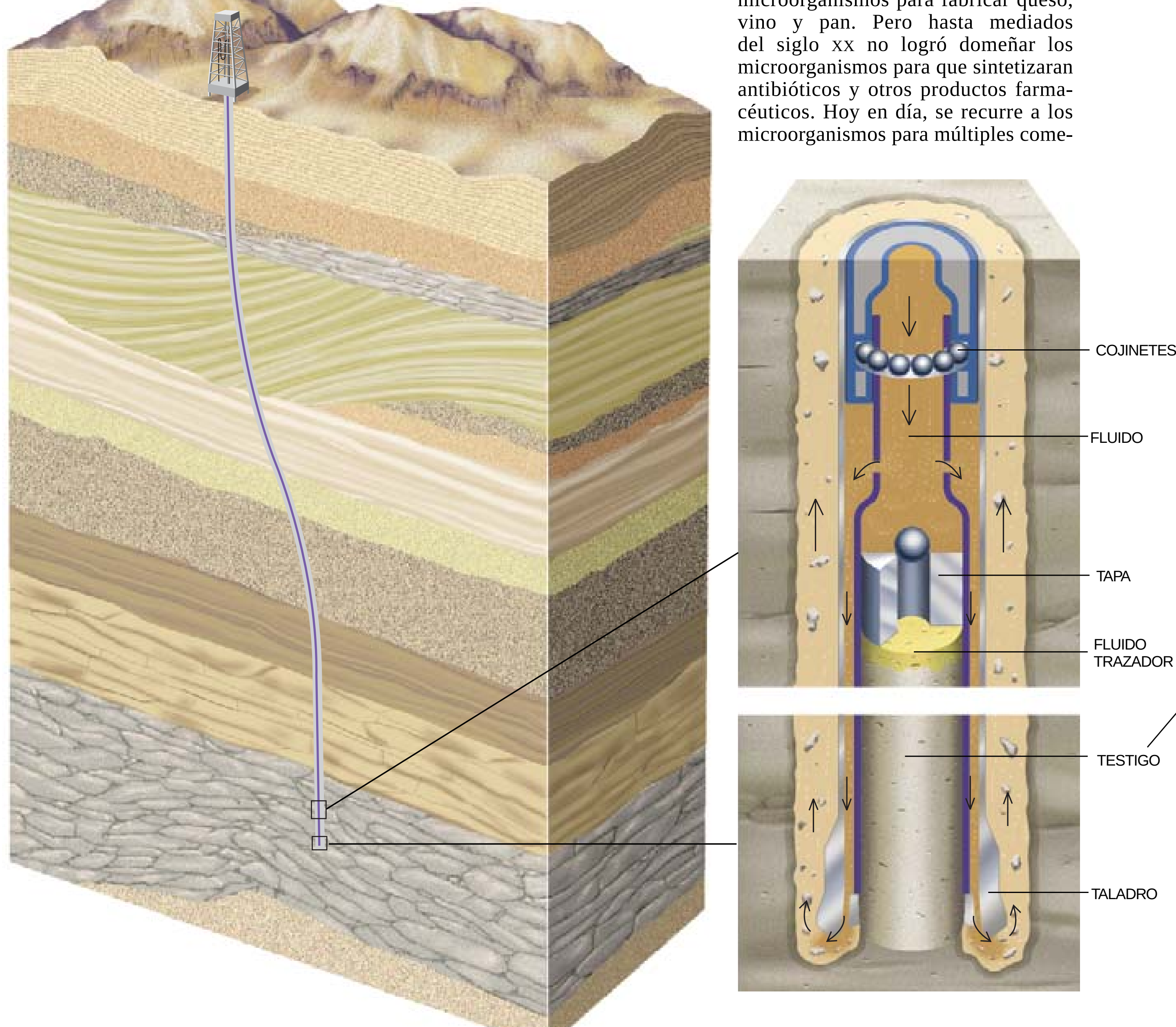
Vida en las profundidades de la Tierra

El descubrimiento reciente de microorganismos que habitan en el interior de la corteza terrestre podría revelar indicios sobre el origen de la vida

James K. Fredrickson y Tullis C. Onstott

Los organismos unicelulares —bacterias, hongos y protozoos— medran por doquier en la superficie terrestre. Habitan en las aguas hirvientes de las fuentes termales y en los suelos frescos de los jardines. Los microorganismos aportan servicios esenciales a otras criaturas mediante la descomposición de productos de desecho y la formación de nutrientes. Pero también los hay que dañan a los organismos superiores, en los que producen infecciones y enfermedades. Para nuestra fortuna, la ciencia ha aprendido a controlar muchos de estos efectos perniciosos y ampliar, por contra, las vías a través de las cuales los microorganismos reportan beneficios para el hombre.

Durante miles de años, el hombre ha venido aprovechándose de las actividades metabólicas de los microorganismos para fabricar queso, vino y pan. Pero hasta mediados del siglo XX no logró domeñar los microorganismos para que sintetizaran antibióticos y otros productos farmacéuticos. Hoy en día, se recurre a los microorganismos para múltiples come-



tidos: control de plagas, tratamiento de aguas residuales y degradación de vertidos de crudo.

Muchísimos usos novedosos están por descubrir. Mientras tanto, los biólogos continúan rastreando la superficie de la Tierra en busca de microorganismos de interés en la industria farmacéutica y en la mejora de los procesos industriales. Lo que no se le ocurría a nadie era husmear en el interior de la Tierra. Estaba muy asentada la idea de que se trataba de un medio estéril. Pero hace algunos años ese prejuicio cayó.

Hay vida

Los primeros indicios de que había microorganismos vivos en las profundidades de la corteza —de cientos a miles de metros bajo tierra— aparecieron en los años veinte, a raíz de los trabajos de Edson S. Bastin, geólogo de la Universidad de Chicago. Bastin se extrañó de que el agua extraída de los yacimientos petrolíferos tuviera sulfuro de hidrógeno y bicarbonato. Tras darle muchas vueltas, aventuró una explicación. Sabía que, en zonas de la superficie anaerobias, sin oxígeno, las bacterias reductoras de sulfato podían utilizar esta base para respirar. En coherencia con esa observación, Bastin argumentó que tales bacterias vivirían también bajo tierra en reservorios de petróleo y producirían sulfuro de hidrógeno y bicarbonato cuando degradaban los componentes orgánicos del petróleo.

Hacia 1926, Bastin y Frank E. Greer, colega suyo de la Universidad de Chicago y microbiólogo, habían logrado cultivar bacterias reductoras de sulfato procedentes de muestras de agua subterránea, extraídas de un depósito de petróleo que estaba a cientos de metros del suelo. En su opinión, aquellos microorganismos descendían de otros sepultados más de 300 millones de años antes, cuando se depositaron los sedimentos que constituyeron el reservorio de petróleo. Pero carecían de medios para someter a prueba hipótesis tan sugestiva. Por aquellos días recibíase con escepticismo la idea de que existieran microorganismos viviendo bajo tierra; aducíase que las técnicas empleadas en las perforaciones petrolíferas no estaban diseñadas para obtener muestras puras, sin contaminar por microorganismos de la superficie. Así languideció la hipótesis de Bastin y Greer.

El interés por la microbiología de los depósitos de petróleo conoció un período de revitalización en las postrimerías de los años cuarenta y el decenio de los cincuenta, cuando el grupo de Claude E. Zobell, de la Institución Scripps de Oceanografía, investigó los procesos microbianos desarrollados en sedimentos enterrados muy por debajo del lecho marino. Pero la investigación de la microbiología del subsuelo volvió a abandonarse en los años sesenta y setenta. Pese a la importancia que las formaciones de rocas tenían como reservorios y canalizaciones subterráneas de agua, no solía plantearse la posibilidad de la existencia de actividad microbiana suelo adentro. Los investigadores aceptaban en su mayoría que el agua se limitaba a producir alteraciones químicas de tipo inorgánico a su paso y que las influencias biológicas quedaban restringidas a los estratos de suelo inmediatos a la superficie. Sin apenas cuestionarlo, se daba por supuesto que los microorganismos encontrados en las muestras de agua subterránea tomadas a gran profundidad se habían infiltrado en ella a su paso por la superficie.

Llegamos así hasta finales de los setenta y principios de los ochenta. Ocurre entonces que el interés por la calidad del agua subterránea promueve la investigación de la química de ese recurso. El trabajo lo auspiciaron dos instituciones norteamericanas: el Servicio de Inspección Geológica y la Agencia de Protección Ambiental. En ese contexto, se replantea la posibilidad de la presencia de microorganismos en formaciones rocosas por donde aflorara el agua. Contemporáneamente, el departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) afrontó la imponente tarea de limpiar las instalaciones industriales donde se habían producido materiales nucleares. (En el marco de la guerra fría, el DOE había vertido grandes cantidades de residuos —soluciones ricas en compuestos orgánicos, metales y materiales radiactivos— en el suelo de esas centrales nucleares.) Los expertos del DOE estudiaban proyectos de depósitos subterráneos que pudieran confinar altos niveles de radiactividad a lo largo de milenios.

Por esas fechas, Frank J. Wobber, geólogo y directivo del DOE, puso sobre la mesa la cuestión inquietante de que, si había microorganismos

JAMES K. FREDRICKSON y TULLIS C. ONSTOTT dirigen el trabajo de investigación del programa de ciencia del subsuelo del Departamento de Energía. Fredrickson es microbiólogo especializado en la aplicación de métodos moleculares e isotópicos en las investigaciones sobre bacterias del subsuelo. Onstott, que enseña en el departamento de geología de la Universidad de Princeton, es experto en la historia del fluido y del flujo del calor en el interior de la corteza terrestre.



1. LA EXPLORACION DEL SUBSUELO (*página precedente, izquierda*) se acomete mediante un tubo rotario de acero, muy largo, que serpentea corteza adentro desde una torreta de perforación hacia una zona prefijada. Conforme el tubo gira, una broca de diamante va cortando la roca circundante del fondo de la perforación (*detalle, parte inferior izquierda*) y rodea un testigo que luego se extrae cuando se iza el tubo. Se emplea un fluido lubricante con una sustancia trazadora especial que se bombea hacia el centro del conducto (*detalle, parte superior izquierda*) y sale hacia fuera a través de los intersticios de la broca (*flechas*). El testigo rocoso se va acomodando a medida que giran tubo y broca, pues se asienta dentro de un tambor interno inmóvil que es aguantado por unos cojinetes. Conforme el testigo va ocupando el tambor interno, una bolsa de material trazador concentrado se abre por encima y recubre la superficie externa de la muestra (*amarillo*). Los testigos así extraídos se trocean en cortos segmentos, cuya capa externa, marcada por el trazador, se desbasta para evitar la contaminación (*arriba, izquierda*). En el interior prístino del testigo aparecerán bacterias que viven en el subsuelo profundo (*arriba, derecha*).

en las profundidades de la corteza, podrían facilitar la degradación de contaminantes orgánicos enterrados o dañar peligrosamente la integridad de las cámaras cerradas que almacenaban los residuos radiactivos. Pero antes de abordar la vertiente práctica que tal posibilidad entrañaba, era necesario ahondar en la investigación básica. Así nació el Programa de Ciencia del Subsuelo del DOE, con el fin de sufragar los estudios de un equipo pluridisciplinar de biólogos, geólogos y químicos que se dedicara a la búsqueda sistemática de formas de vida de las profundidades y al análisis de su actividad.

Puesto que el agua extraída de profundas perforaciones se contamina fácilmente con organismos que viven cerca de la superficie, el equipo reunido por Wobber decidió estudiar fragmentos de roca en vez de muestras de agua. De entrada, el grupo necesitaba un método para sacar testigos limpios e intactos de roca del interior de la corteza (*cores*).

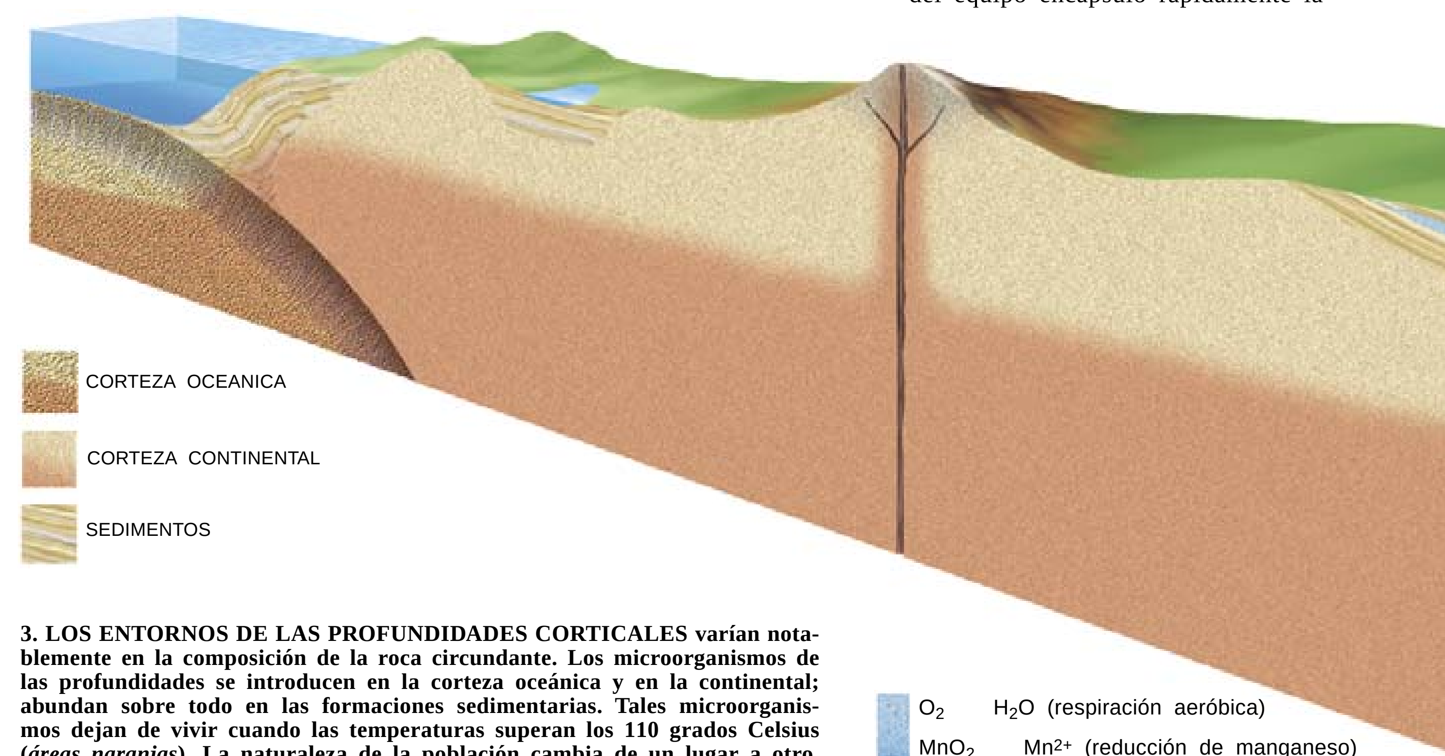


2. VITRINA CON GUANTERAS, donde los guantes de látex se adentran en el interior y permiten trabajar cerca de los yacimientos de perforación para manipular las muestras sólidas extraídas del subsuelo profundo. Estas cámaras de plástico están rellenas de un gas no reactivo, para evitar que el oxígeno dañe los microorganismos del interior de los testigos de roca.

Tommy J. Phelps, del Laboratorio de Oak Ridge, y W. Timothy Griffin, de Golder Associates, lograron diseñar un aparato taladrador especial que minimizaba el contacto de las muestras con el fluido necesario para lubricar la perforación. James P. McKlinley, del Laboratorio del Noroeste del Pacífico en Battelle, junto con F. S. (Rick) Colwell, del Laboratorio de Ingeniería de Idaho, idearon “trazadores” especiales —aditivos que podían mezclarse con el fluido de la perforación para indicar si este líquido (y cualquier microorganismo que hubiera en su interior) podía haber penetrado en las muestras recogidas.

Descubrimiento de un filón

La búsqueda de microorganismos del subsuelo comenzó en 1987, cuando el DOE decidió realizar diversas perforaciones profundas en Carolina del Sur, cerca de la planta de procesado de residuos nucleares del río Savannah. Codo con codo con los operarios de la plataforma de perforación, empezó a trabajar un equipo de científicos de campo para evitar la contaminación microbiana. Los investigadores añadieron trazadores y controlaron los procesos sincronizados a medida que se desarrollaba la perforación. Cuando los perforadores izaron un testigo hasta la superficie, un miembro del equipo encapsuló rápidamente la



3. LOS ENTORNOS DE LAS PROFUNDIDADES CORTICALES varían notablemente en la composición de la roca circundante. Los microorganismos de las profundidades se introducen en la corteza oceánica y en la continental; abundan sobre todo en las formaciones sedimentarias. Tales microorganismos dejan de vivir cuando las temperaturas superan los 110 grados Celsius (*áreas naranjas*). La naturaleza de la población cambia de un lugar a otro. Por ejemplo, un estrato sedimentario poroso que sirve de conducto de agua subterránea podría contener zonas ricas en oxígeno (*azul luminoso*) y zonas pobres en oxígeno (*azul oscuro*), y las bacterias encontradas dentro de sus diferentes regiones variarán a tenor de las reacciones químicas que empleen para procurarse energía (*barra, derecha*).

muestra y la introdujo en una "bolsa guante" para su procesamiento ulterior. Estas vitrinas plásticas ofrecen un ambiente esterilizado, amén de estar llenas de un gas no reactivo (nitrógeno) que protege a cualquier microorganismo anaerobio obligado —bacterias que sufrirían un rápido envenenamiento por el oxígeno del aire.

Usando guantes quirúrgicos de látex unidos al interior de estas bolsas, los miembros del equipo utilizaron herramientas esterilizadas para desbastar la porción externa de cada testigo, dejando tan sólo la parte que tenía menos aspecto de haber estado expuesta a contaminaciones bacterianas en el líquido de la perforación. Si una filtración del trazador químico indicaba que un espécimen particular podía haberse infectado, los científicos que lo analizaban advertían que la muestra de la que procedía, muy probablemente, estaba contaminada.

Posteriormente, las muestras intactas más internas del cilindro pasaron a recipientes esterilizados y llenos de nitrógeno, embaladas en hielo y transportadas hasta el laboratorio de investigación. Dentro de las 72 primeras horas tras la extracción de las rocas del subsuelo, otros miembros del grupo, dispersos por distintas instituciones, fueron sometiendo las muestras a una batería de pruebas diseñadas para examinar las rocas y los microorganismos que éstas hospedaban. Tras estos ensayos iniciales, se enviaron los microorganismos aislados a partir de las muestras a depósitos especiales de Florida y Oregón, donde quedaron almacenados en nitrógeno líquido a –96 grados Celsius.

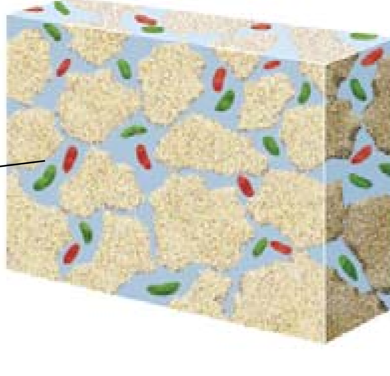
Los primeros resultados de esta búsqueda de formas de vida alojadas en las profundidades fueron extraordinarios. Se supo muy pronto que bajo el río Savannah, a profundidades de por lo menos 500 metros (el testigo extraído a mayor profundidad), vivían diversos tipos de microorganismos. Nosotros y cuantos trabajaban en el programa subvencionado por el DOE habíamos examinado otros muchos enclaves geológicos. Aunque queda por confirmar la extensión ocupada por hongos y protozoos, los resultados revelan sin ambages la ubicuidad de las bacterias del subsuelo. Hemos extraído estos organismos desde formaciones donde reinan temperaturas altas, de hasta 75 grados C, y desde profundidades superiores a 2,8 kilómetros.

¿Qué determina la profundidad máxima a la que los microorganismos del subsuelo pueden vivir? La presión soportada no ejerce un significativo efecto directo sobre los microorganismos, aun cuando se encuentren varios kilómetros bajo la superficie. Pero la temperatura creciente sí limita la profundidad de la vida suelo adentro. Aunque no acaba de acotarse la temperatura máxima que estos organismos pueden tolerar, los expertos en biología oceánica han encontrado bacterias que medran a 110 grados C en surgencias hidrotermales submarinas; para algunos, los microorganismos del subsuelo podrían resistir temperaturas de hasta 140 grados C, al menos durante períodos cortos.

En la corteza oceánica, donde la temperatura sube unos 15 grados C por cada kilómetro de profundidad, la tolerancia de 110 grados permite que la vida microbiana se extienda, en promedio, unos siete kilómetros suelo submarino adentro. En la corteza continental, donde la temperatura suele rayar los 20 grados C en la superficie para aumentar unos 25 grados por kilómetro, la vida microscópica debería, como término medio, adentrarse hasta casi 4 kilómetros bajo el suelo.

Sin embargo, la concentración de microorganismos variará bastante de un lugar a otro, aunque hablemos de la misma profundidad. En este sentido, hemos descubierto que muestras tomadas a 400 metros suelo adentro pueden contener desde un centenar exiguo de bacterias hasta 10 millones por gramo de roca. El equipo de John R. Parkes, de la Universidad de Bristol, ha encontrado concentraciones superiores de microorganismos viviendo en sedimentos bajo el suelo oceánico. Por mor de comparación, sépase que la franja superior de los suelos dedicados a la agricultura contiene, normalmente, más de mil millones de bacterias por gramo de tierra.

Parece que la riqueza de vida en las profundidades no depende sólo de temperaturas tolerables, sino también de la capacidad del entorno para aportar lo necesario en el crecimiento y la multiplicación. Son requerimientos indispensables el agua y el espacio en los poros de la roca. La región que aloja a los microorganismos debe también contener los nutrientes —carbono, nitrógeno, fósforo y varios metales traza— que los microorganismos precisan para sintetizar sus componentes celulares, incluidos el ADN y las proteínas. El ambiente debe, asimismo, ofrecer alguna forma de combustible para proporcionar la energía que requiere el desarrollo de estas actividades.



4. LOS ECOSISTEMAS microbianos litoautotróficos del subsuelo (SLiMEs) se desarrollan en los poros entrelazados entre los granos de mineral de muchas rocas ígneas. Los microorganismos autotróficos (*verde*) recaban nutrientes y energía de los compuestos químicos inorgánicos de sus alrededores; otros muchos microorganismos (*rojo*), en cambio, se alimentan de los compuestos orgánicos creados por los autótrofos.

De la arenisca al lodo

Los tipos de microorganismos encontrados en el interior de la corteza dependen de las particularidades del ambiente local. Diversas comunidades bacterianas habitan en la mayoría de las rocas sedimentarias, que acostumbran abundar en

compuestos orgánicos de los que se nutren los microorganismos. Estos nutrientes los produjeron en su origen plantas de la superficie, antes de que las arenas movedizas, los cienos o las arcillas que constituyen la mayoría de las formaciones sedimentarias se sepultaran y acabaran constituyendo rocas sólidas. Mientras queden nutrientes disponibles, los microorganismos que viven en el interior de los poros de los sedimentos pueden continuar viviendo y multiplicándose. Las rocas sedimentarias aportan también formas oxidadas de azufre, hierro y manganeso que pueden proporcionar la energía que estos microorganismos necesitan. Las fuentes de energía química son las reacciones de reducción (procesos que entrañan una ganancia de electrones).

Conforme los sedimentos van sepultándose en el transcurso del tiempo geológico, aumenta su grado de compactación. El espacio poroso termina por cerrarse con minerales que precipitan a partir de los fluidos que atraviesan la roca. En consecuencia, al aumentar la profundidad y la presión, decrecen gradualmente las posibilidades de recabar nutrientes y la tasa metabólica global de las comunidades microbianas; los microorganismos resisten en torno a puntos de reservas ricas en nutrientes. En resumen, la distribución de microorganismos en los sedimentos es poco uniforme. Pequeñas colonias —o incluso células solitarias— medran separadas unas de otras en el interior de la roca. No debe, pues, sorprendernos que la búsqueda de microorganismos sea un acontecimiento de resultado incierto. Todd O. Stevens, del Laboratorio del Noroeste del Pacífico en Battelle, ha encontrado que, en el caso del sedimento recogido cerca de las instalaciones de Hanford del DOE, cuanto mayor era la muestra examinada mayor probabilidad había de encontrar actividad microbiana.

Aunque bastante inhóspita, esta roca sedimentaria endurecida no es el ambiente más hostil para los microorganismos de las profundidades. Hay otros entornos peores. El grueso de la corteza continental está constituido por rocas ígneas (esto es, roca solidificada a partir de magma fundido), que contienen poco carbono orgánico. Stevens y McKinley descubrieron bacterias que viven dentro de formaciones ígneas compuestas por capas de basalto (un tipo de roca oscura de grano fino).

Los microorganismos se dan también en otras rocas ígneas. Karsten Pedersen, de la Universidad de Göteborg, detectó bacterias en el agua que fluía a través de profundas fracturas en el granito: variedad de roca ígnea de coloración luminosa y de grano grueso. Puesto que en su fase de formación la roca ígnea está demasiado caliente para soportar la vida, los microorganismos encontrados en su interior llegarían allí, arrastrados por el flujo del agua subterránea, en algún momento posterior al enfriamiento y solidificación del magma originario.

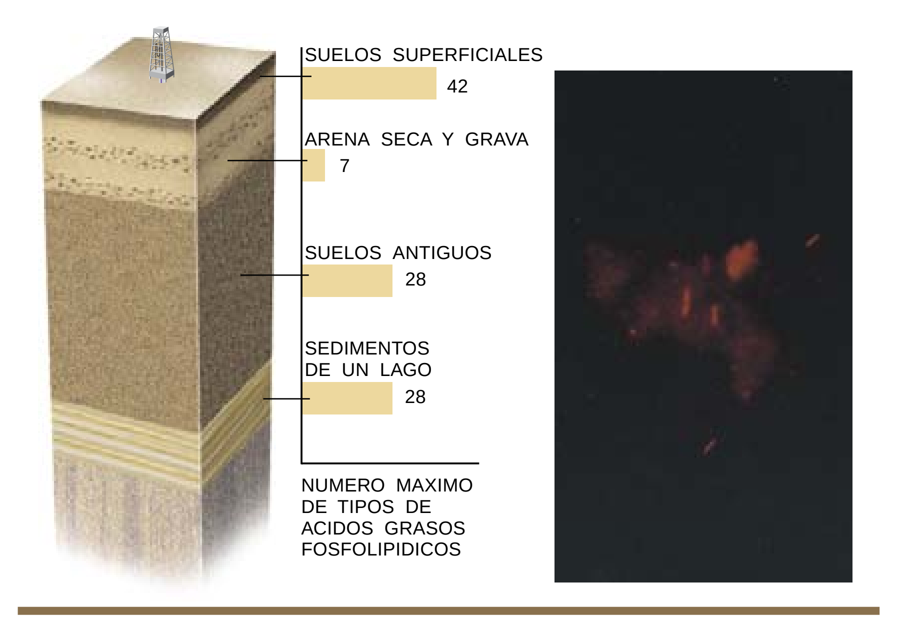
En las formaciones ígneas hay poca materia orgánica sepultada que esté disponible. De ahí la sorpresa de Stevens y McKinley al encontrarse con microorganismos que medraban en basalto. Resolvieron el misterio. Las comunidades bacterianas que allí vivían incluían organismos autótrofos; así se llaman los que, a partir de fuentes inorgánicas, sintetizan compuestos orgánicos (proteínas, gra-

Biodiversidad bajo tierra

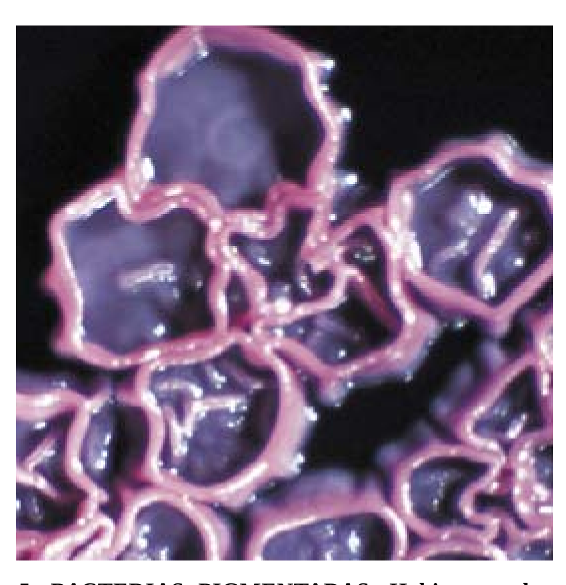
De igual manera que incontables clases de formas vivas cubren la superficie de la Tierra, muchos tipos diferentes de bacterias medran en las entrañas de la corteza. Bajo el microscopio, sin embargo, las diferencias se difuminan bastante, por lo que han de ingeniarse métodos que permitan ponderar la diversidad bacteriana.

Algunos ahorran la necesidad de empezar por realizar cultivos. Puede, por ejemplo, recurrirse a la microscopía de epifluorescencia para poner de manifiesto bacterias que viven dentro de las muestras de roca. Esta técnica se funda en la naturaleza singular del ARN ribosómico encontrado en los distintos tipos de bacterias (las células se valen de los ribosomas para la síntesis de proteínas). Mediante la construcción, en primer lugar, de cortas hebras de ADN de manera que éstas se unan a tipos concretos de ARN ribosómico, uno puede determinar de inmediato la diversidad de familias bacterianas presentes en el testigo. Estas sondas de ADN incluyen un colorante fluorescente; así, cuando las bacterias acumulan esa sustancia, parecen brillar observadas al microscopio de epifluorescencia (*micrografía*).

Otro método para valorar las comunidades microbianas consiste en analizar muestras de ácidos grasos fosfolipídicos. Estas largas cadenas de carbono son las piezas que construyen las membranas celulares bacterianas. Su estructura molecular constituye su huella dactilar, a través de la cual se identifica la familia bacteriana correspondiente. Si se descubren muchos tipos de cadenas de ácidos grasos dentro de una muestra, nos hallaremos ante una comunidad microbiana de un alto grado de diversidad. Por contra, el hallazgo de un bajo número de moléculas de ácidos grasos diferentes indica la presencia de una comunidad de baja diversidad. En un lugar cercano a las instalaciones de Hanford del Departamento de Energía, la perforación reveló que el grado de diversidad bacteriana variaba ampliamente de una zona del subsuelo a otra.



sas y otras biomoléculas ricas en carbono). Muchos tipos de bacterias autotróficas recaban la energía requerida a partir de reacciones químicas inorgánicas donde interviene el hierro o el azufre. Los autótrofos que viven en estos basaltos usan hidrógeno gaseoso para recabar la energía y obtienen el carbono a partir de dióxido de carbono inorgánico. Estos "acetógenos" excretan después compuestos orgánicos simples, que otras bacterias habrán de consumir. En estos basaltos, el gas hidrógeno se produce en la reacción de agua pobre en oxígeno con minerales portadores de hierro. A estos ecosistemas microbianos litoautotróficos de las profundidades les hemos puesto el nombre de "SLiMEs" (acrónimo de *subsurface lithoautotrophic microbial ecosystems*). Tales ecosistemas pueden persistir, indefinidamente, sin ningún aporte de carbono desde la superficie.



5. BACTERIAS PIGMENTADAS. Habitan en las profundidades bajo el suelo de las cercanías de las cataratas del Idaho. Cultivos de estos microorganismos varían su coloración del púrpura al rojo, debido a que producen cantidades copiosas de una sustancia que cambia de tono según la acidez del medio.

¿Tan viejas como las colinas?

Lo mismo que los pioneros Bastin y Greer, también nosotros nos preguntamos si las colonias de bacterias de las profundidades vivirían tanto tiempo como las rocas que las albergan. Longevidad que, sobrado es decirlo, no resulta siempre posible. El incesante enterramiento de sedimentos, a la larga, puede elevar la temperatura lo suficiente para aniquilar la colonia bacteriana entera de una formación rocosa. Puede producirse, asimismo, una esterilización local allí donde el magma caliente fundido alcance los estratos sedimentarios, dejando un núcleo de roca ígnea rodeado de algunos sedimentos achicharrados. Una vez que estas rocas recién solidificadas se enfríen, o fuerzas tectónicas eleven los estratos sedimentarios calientes sepultados en profundidad hacia posiciones más frías y cercanas a la superficie, las bacterias arrastradas por el agua subterránea colonizarán las zonas antes yermas.

Empero, este proceso de infiltración puede ser exasperantemente lento. Ellyn M. Murphy, del Laboratorio del Noroeste del Pacífico en Battelle, ha determinado que el agua subterránea presente muy por debajo de la central del río Savannah no ha estado en contacto con la superficie durante miles de años. En los puntos más profundos que nosotros hemos examinado, nuestras mediciones y la simulación por ordenador nos indican que el agua subterránea ha permanecido aislada de la superficie durante millones de años. Si tenemos en cuenta que los microorganismos no pueden haber descendido suelo adentro a una velocidad mayor que la del agua subterránea, algunas comunidades microbianas de las profundidades tendrán, por lo menos, varios millones de años de edad.

¿Como lograron los microorganismos pervivir tanto tiempo? En algunos casos (así en los SLiMEs), las bacterias sobreviven porque los nutrientes esenciales se renuevan sin cesar; en la mayoría de los otros tipos de formaciones, las fuentes de materia y energía son harto moderadas. Sin embargo, las bacterias residentes parecen haberse adaptado a estas condiciones de vida espartanas. Las bacterias dependen de sus reservas internas durante períodos prolongados de inanición (tal y como hacen los organismos superiores); conforme van consumiendo sus reservas, la mayoría de los tipos de bacterias se encogen desde su tamaño en estado de salud, cifrado en unas micras, hasta menos de una milésima parte de su volumen normal. Thomas L. Kieft, del Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo México, ha observado que esos microorganismos desnutridos tan diminutos (llamados bacterias enanas o "ultramicrobacterias") son habitantes habituales de las profundidades.

La tasa metabólica de las bacterias que han sufrido inanición es, probablemente, muy inferior a la que presentan cuando se hallan bien alimentadas. En virtud de ello, la frecuencia media de divisiones celulares de un microorganismo del subsuelo podría ser de una vez por siglo, si no menos, mientras que los microorganismos del suelo se reproducen en minutos, horas, días o, como máximo, meses. Los microorganismos que viven en las profundidades de la corteza limitan su metabolismo al objeto de resistir la inanición durante períodos largos desde el punto de vista geológico. Estas bacterias pueden permanecer viables con un coste metabólico bajo o nulo.

El ritmo lento del metabolismo microbiano en el subsuelo hace difícil definir el número exacto de bacterias sepultadas en estas rocas que están de verdad vivas. Para saberlo podemos contar sólo los microorganismos cuyo desarrollo puede promoverse en el laboratorio. Más del 10 % de las células extraídas de los sedimentos arenosos donde nutrientes y agua fluyen en libertad proliferarán cuando se les aporte un suplemento de nutrientes en el laboratorio. Por contra, menos de la décima parte del 1 % de las células extraídas de los sedimentos del árido oeste norteamericano (donde el flujo de agua es mínimo) crecerá en una placa de cultivo.

El fracaso en el cultivo de la mayoría de las bacterias del subsuelo podría atribuirse a nuestra incapacidad para reproducir *in vitro* las condiciones necesarias. Quizá se trate de que estos organismos no están ya vivos; en rocas donde el flujo de nutrientes y agua es bajo, las bacterias muertas se descomponen con suma parsimonia, razón por la cual algunos de nuestros ensayos bioquímicos las recontarían junto con las bacterias vivas. O tal vez la mayoría de los organismos podrían estar funcionando, pero habrían perdido la capacidad de replicarse.

Las perspectivas bajo tierra

David L. Bulkwill lleva ya catalogadas y guardadas más de 9000 cepas de microorganismos procedentes de diversas zonas corticales. Estos aislados —con un amplio surtido de bacterias y un centenar de tipos de hongos— son una fuente nueva de vida microbiana que no se ha analizado

aún del todo ni se ha ensayado para extraerle su potencial comercial.

Del pequeño porcentaje examinado con cierto detalle, hay una proporción sorprendentemente alta que muestra capacidades en principio muy valiosas. Se ha comprobado, entre otras propiedades, su capacidad para degradar compuestos orgánicos tóxicos y para sintetizar antibióticos, enzimas termoestables e incluso pigmentos nuevos. Los laboratorios Pfizer están cribando 3200 tipos de bacterias del subsuelo para la fabricación de nuevos productos antimicrobianos; la empresa ZymoGenetics tiene en examen al menos 800 aislados de ese archivo para la comercialización de otras sustancias útiles.

Es de suponer que de tales investigaciones resultarán muchos productos comerciales. Mas, aun cuando no se alcanzaran esos rendimientos prácticos, el trabajo empeñado en la demostración de la existencia de vida en las entrañas del planeta recompensará a los científicos con un mayor conocimiento del desarrollo de microorganismos en condiciones extremas. El estudio de esas comunidades podría orientar nuestra comprensión sobre los caminos seguidos por la vida en sus albores antes de la llegada de la fotosíntesis. También podría proporcionar nuevas pistas para un planteamiento correcto de las posibilidades de que haya microorganismos vivos en el suelo de Marte o allende la envoltura helada de algunos satélites del sistema solar exterior. Al contemplar la pervivencia de los microorganismos que sobreviven en las duras condiciones de su entierro dentro de la corteza, nos sentimos doblemente inclinados a admitir la posibilidad de que haya diminutos extraterrestres que nos acechan desde el exterior.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE DEEP SUBTERRANEAN BIOSPHERE. Karsten Pedersen en *Earth Science Reviews*, vol. 34, n.º 4, páginas 243-260; agosto 1993.

GROUND-WATER MICROBIOLOGY AND GEOCHEMISTRY. Francis H. Chapelle. John Wiley and Sons, 1993.

THE BIOSPHERE BELOW. Daniel Grossman y Seth Shulman en *Earth: The Science of Our Planet*, vol. 4, número 3, páginas 34-40; junio 1995.

GEOMICROBIOLOGY. Tercera edición. Henry L. Ehrlich. Marcel Dekker, 1996.

Información adicional del Programa de Ciencia del Departamento de Energía de la Subsuperficie está disponible en el World Wide Web, http://www.er.doe.gov/production/oher/EPR/subprog.html

Ciencia y sociedad

Filogenia molecular

La función del polen

Desde Darwin, y sobre todo desde su epígono E. Haeckel, todas las clasificaciones de los seres vivos han intentado reflejar no sólo la proximidad, sino también la historia evolutiva de las especies. Pero todos los modelos clasificatorios que tienen en cuenta la evolución, la filogenia de las plantas, han tropezado con una limitación: se apoyan en los caracteres morfológicos, desde el color de los pétalos hasta la micromorfología de los granos de polen. Ahora bien, esos parecidos morfológicos pueden indicar, simplemente, la adaptación a unas mismas condiciones ambientales, un fenómeno que se conoce como convergencia; en estos casos, la morfología no sirve para aclarar la filogenia de las especies.

Un ejemplo obvio de convergencia nos lo ofrecen las plantas que viven en los desiertos. Todas tienen los tallos crasos y las hojas reducidas a espinas. En los desiertos de América, estas plantas espinosas pertenecen en su mayoría a la familia de las Cactáceas. En cambio, en los desiertos africanos, las especies que presentan esa misma morfología pertenecen a las Euforbiáceas. A pesar del parecido morfológico, las dos familias no están ni cercanamente relacionadas.

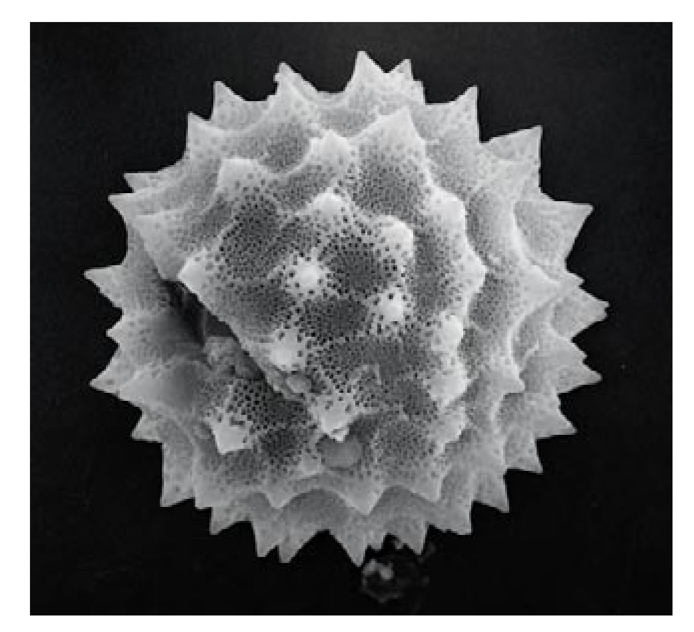
La coincidencia en la morfología de Cactáceas y Euforbiáceas se debe a que viven en un ambiente hostil, que fuerza una serie de adaptaciones, siempre las mismas: para sobrevivir en el desierto son imprescindibles los tallos capaces de almacenar agua y de cumplir funciones asimiladoras normalmente reservadas a las hojas, que se reducen a espinas para defenderse de los herbívoros.

Podemos librarnos de lastre de los factores ambientales comparando directamente regiones homólogas de ADN en distintos grupos. Las regiones del ADN que se usan para descubrir la filogenia de los grupos taxonómicos son adaptativamente neutras, lo que significa que la probabilidad de encontrar fenómenos de convergencia en el estudio del ADN es despreciable.

Los botánicos llevan ya varios años aplicando a la sistemática las técnicas moleculares de análisis de las secuencias del ADN. Los resultados confirman que el estudio directo del ADN es indispensable para verificar las hipótesis sobre la filogenia de las plantas construida a partir de datos morfológicos.

Desde 1985 la filogenia molecular cuenta con una herramienta muy poderosa, la reacción en cadena de la polimerasa. El método se basa en el uso de una enzima, la polimerasa, que utilizan todos los organismos para reparar cadenas de ADN dañadas. La polimerasa reconstruye la doble cadena usando como molde la cadena que haya quedado intacta; lógicamente, si el daño es general y afecta a las dos cadenas del ADN, no hay reparación posible.

La técnica es muy simple. Se calienta el ADN a 95 ºC para desnaturalizarlo, es decir, para separar las dos cadenas. A continuación, se enfría hasta unos 50º-60º para que se fijen sobre las cadenas unos pequeños fragmentos de ADN, llamados iniciadores, a partir de los cuales la polimerasa hará crecer de nuevo la doble cadena original. Repitiendo el procedimiento, se puede multiplicar (“amplificar”) un determinado fragmento de ADN a partir de la reconstrucción de nuevas cadenas de ADN idénticas a la que ya tenemos. Las secuencias de los iniciadores, por su parte, determinan qué región concreta del ADN se multiplicará. El resultado es un gran número de copias de esa





1. La evolución morfológica del polen avanza desde las formas espinosas hasta los tipos de polen lisos. A la izquierda, polen de tipo Serratula *y a la derecha de tipo* Scabiosa*, en fotografías obtenidas por microscopio electrónico de barrido*




2. *Comparación de la forma de las flores de la periferia de un tipo primitivo,* Chirolophus sempervivens (izquierda)*, con la morfología floral de una especie muy evolucionada,* Centaurea cyanus (derecha)

zona específica, con las que podemos estudiar la secuencia de bases.

Con el tiempo, el método se perfeccionó gracias al descubrimiento de la polimerasa de una bacteria termofílica, *Thermus aquaticus*, capaz de resistir las temperaturas de hasta 95º que se aplican en el proceso. (Las ADN polimerasas de los otros organismos sólo resisten temperaturas de unos 50 ºC.) Gracias a esta enzima, se pudo mecanizar el proceso y llevarlo a cabo en un termociclador automático.

A grandes rasgos, la elección de la región del ADN que se va a secuenciar para resolver un problema filogenético está en relación directa con el nivel taxonómico en el que se ha planteado el problema. Lógicamente, cuanto más lejanas estén dos entidades taxonómicas, más baja deberá ser la tasa de mutación del ADN que vamos a utilizar: si los ADN son demasiado diferentes, nos será imposible comprobar que estamos analizando regiones homólogas. Los primeros pasos en los estudios filogenéticos mediante el ADN se dieron en niveles taxonómicos altos (Clase, Orden y Familia); para esos rangos, se usaron los genomas mitocondrial y cloroplástico. Estos genomas tienen una tasa de mutación muy baja, debido a su herencia uniparental y al hecho de que codifican genes muy importantes en el metabolismo celular. En este contexto, en 1993 se publicó una filogenia del conjunto de las plantas superiores basada en las secuencias cloroplásticas de representantes de unas 60 familias diferentes.

En cambio, hay regiones del genoma nuclear que no tienen actividad génica y pueden acumular mutaciones rápidamente sin efectos dañinos para la célula. Esta tasa de mutación alta las hace adecuadas para el ámbito taxonómico de nivel específico, genérico, subtribal y, como máximo, tribal. Una de las mejores regiones desde este punto de vista, y en la que hemos centrado nuestros trabajos, es la región de los llamados espaciadores internamente transcritos (ITS).

La región ITS, un pequeño sector del genoma ribosómico-nuclear, consta de tres componentes: la subunidad 5,8S, con una secuencia muy conservada, y dos espaciadores mucho más variables. La región está situada entre dos dominios génicos, el del cistrón 18S y el del 26S. También la subunidad 5,8S tiene función génica. Los tres componentes mencionados son muy conservadores y presentan tasas de mutación bajísimas.

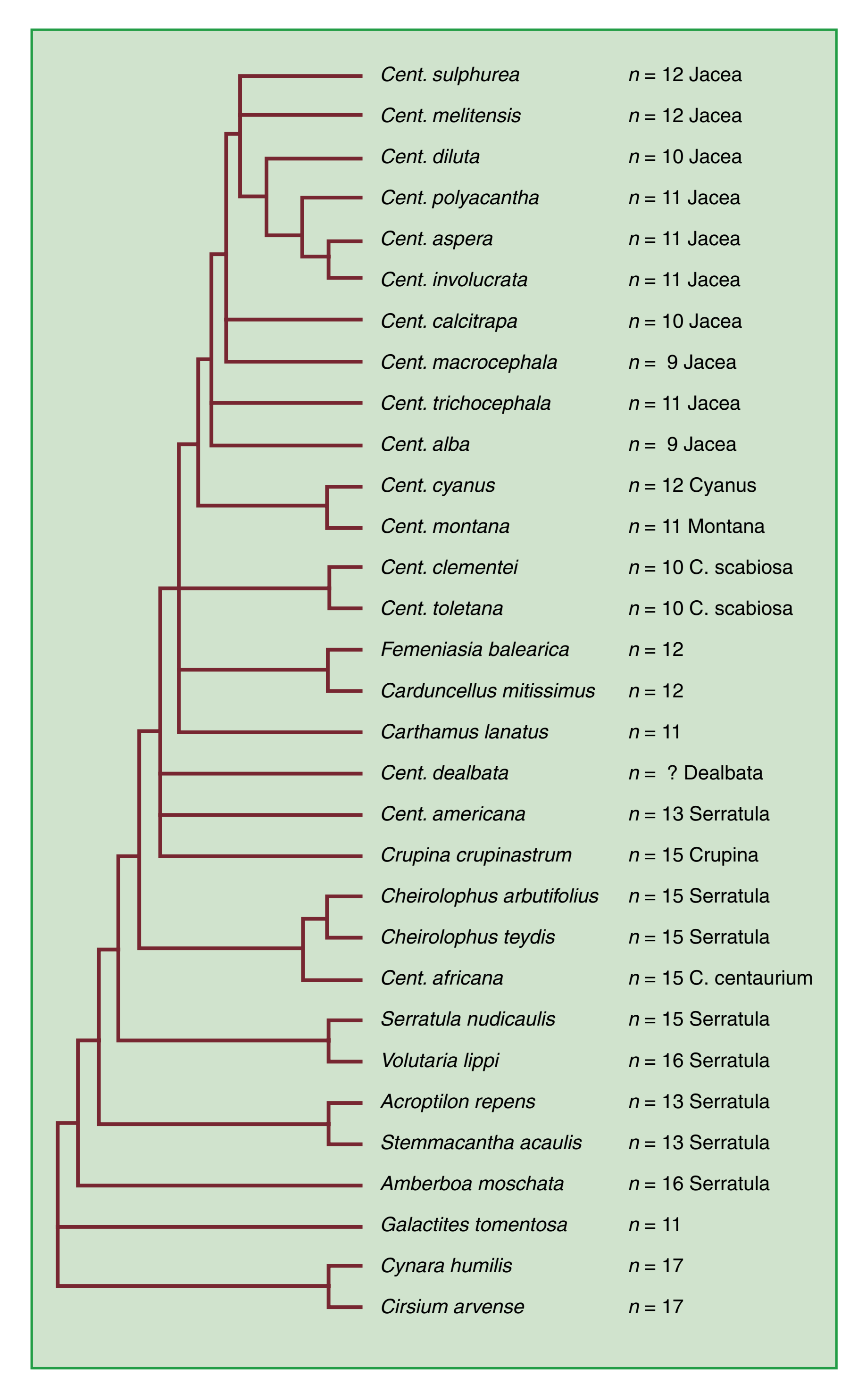
Los espaciadores son una parte del ADN ribosómico-nuclear que no se incorpora en los ribosomas maduros, aunque sí actúan en la maduración del ARN ribosómico. En distintos estudios se ha comprobado que la longitud de la secuencia espaciadora y el porcentaje de guaninas con sus citosinas complementarias es muy variable, pero dentro de unos límites. Si se acumulan demasiadas mutaciones en los espaciadores, se puede inhibir la maduración del ARN. De todos modos, su tasa de variación está muy por encima de las regiones génicas.

La región ITS ofrece varias ventajas para los estudios de filogenia. En primer lugar, está muy repetida en el genoma nuclear; el alto número de copias simplifica la detección y amplificación del ADN. Muestra, además, una rápida evolución concertada que uniformiza rápidamente las secuencias del ITS en las poblaciones. En tercer lugar, el pequeño tamaño y la existencia de secuencias muy conservadoras a ambos lados de los espaciadores facilitan la multiplicación de la región. Pese a su cortedad, en cuarto lugar, acumula mucha variación (recordamos que sólo tiene función mecánica, pues no se transcribe) y proporciona la misma información filogenética que regiones más largas. Por último, su longitud varía poco entre especies próximas, y las zonas más variables alternan con zonas muy conservadas, lo que facilita la alineación.

La subtribu de las Centaureíneas, de la familia de las Compuestas, comprende algo más de medio millar de especies. Es una de las más complicadas e interesantes de la flora mediterránea. A la hora de clasificar con un criterio evolutivo un grupo tan amplio y tan diverso, el primer recurso son los caracteres morfológicos. Resaltaremos la anatomía del polen, la morfología floral y la morfología de los aquenios. Todos ellos están interrelacionados, de manera que los explicaremos juntos.

La evolución polínica procede desde los tipos de polen más primitivos, con grandes espinas, hasta los tipos de polen lisos. Esta evolución es paralela al perfeccionamiento del mecanismo de presentación del polen, por un lado; por otro, va acompañada de la especialización de las flores de la periferia de los capítulos en la atracción de insectos.

En el resto de la tribu de las Cardueas, a la que pertenecen nuestras Centaureíneas, y en las Centaureíneas de los grupos más arcaicos, todos los tipos de polen se caracterizan por ser densamente espinosos. Estas espinas aumentan la adherencia del polen a los insectos. En los grupos más evo-



3. Arbol filogenético de las Centaureíneas obtenido a partir de las secuencias de la región ITS. En el árbol vemos marcados los números cromosómicos de las especies del estudio. En la parte superior del árbol, que corresponde a especies más evolucionadas, el número cromosómico va de x = 9 *a* x = 12*; en cambio, en la parte inferior del árbol, que corresponde a especies menos evolucionadas, encontramos números cromosómicos más altos: de* x = 13 *a* x = 16*. La filogenia de las secuencias de la región ITS también se correlaciona con el tipo de polen. En la parte superior del árbol están los tipos de polen que se consideran más evolucionados,* Jacea *y* C. scabiosa*. Podemos ver que entre estos están otros tipos de polen: el tipo* Cyanus *y el tipo* Montana*, que se consideran intermedios. A continuación, en el centro del árbol, está el tipo* Dealbata*, también intermedio, y ya en la parte inferior del árbol los tipos* Centaurea centaurium*, el tipo* Serratula *y el tipo* Crupina*, todos ellos muy espinosos y tenidos por menos evolucionados*

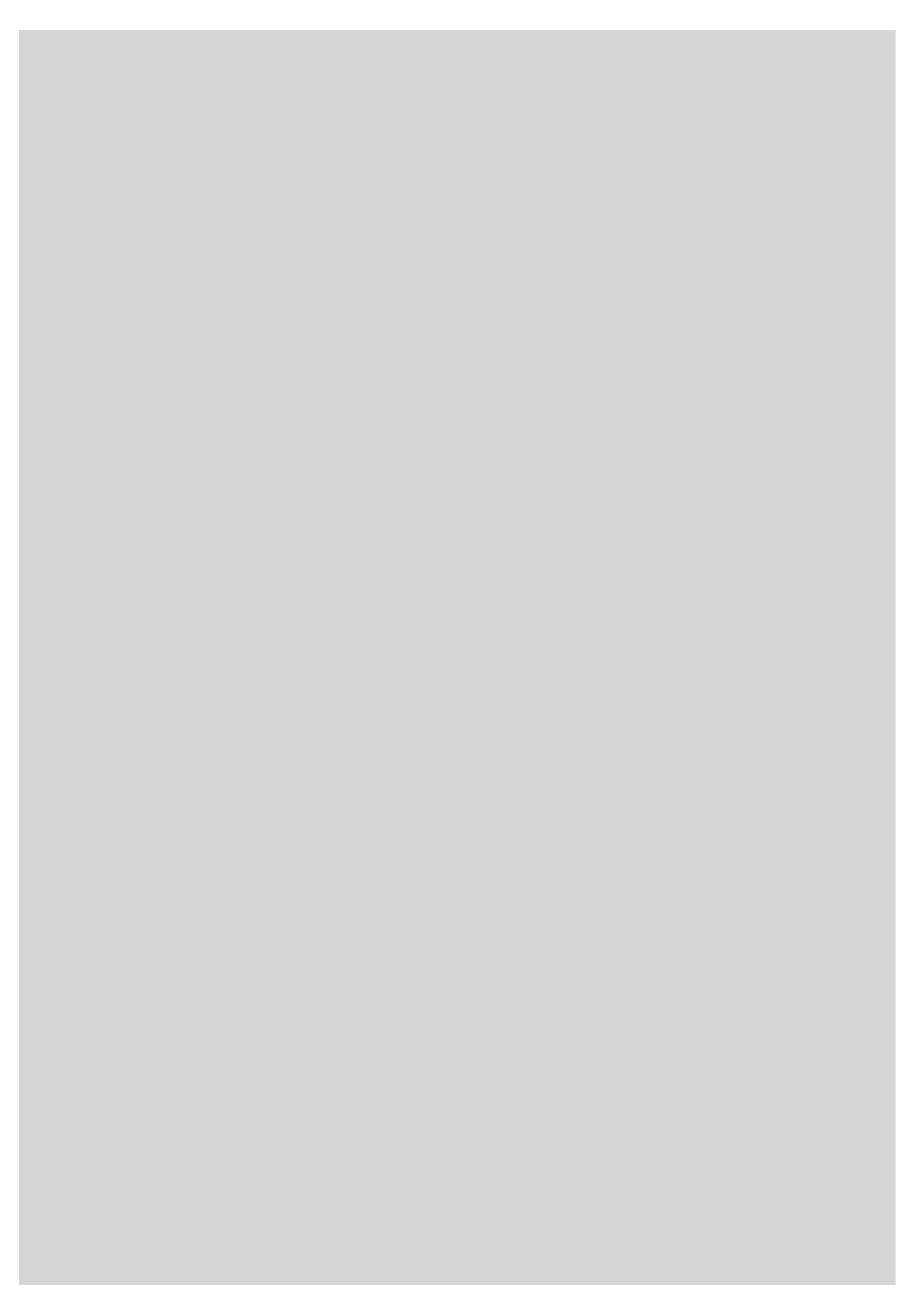
lucionados los granos se han vuelto casi lisos porque han desarrollado un refinado sistema de presentación de polen que hace innecesarias las espinas en el polen. El mecanismo es sencillo, pero muy efectivo: si un insecto toca una flor, ésta reacciona instantáneamente contrayendo el tubo de las anteras y emitiendo una descarga de polen.

Estas especies presentan las flores de la periferia del capítulo muy diferentes de las centrales, aumentando drásticamente la capacidad de atraer a los insectos. A lo largo de la evolución del grupo, que conduce a tipos de polen lisos, vemos cómo aparecen flores estériles, muy llamativas en algunos casos. Evolutivamente es un gran adelanto porque los capítulos pueden ser menores, más económicos para la planta.

En cuanto a los aquenios, la evolución está también asociada a la especialización en una forma de dispersión: la mirmecocoria o dispersión por las hormigas. En las Carduíneas, los vilanos de las cipselas tienen la función que se suele asociar a ellos en el resto de la familia de las Asteráceas: la diseminación por el viento. A lo largo de la evolución de las Centaureíneas, el vilano va perdiendo esa función, paralelamente a la aparición de un eleosoma (cuerpo graso), que atrae a las hormigas.

Hay un último argumento que apunta en la misma dirección: el número de cromosomas. En general, los números cromosómicos de las especies más modernas van de $x = 9$ a $x = 12$; en cambio, en las especies menos evolucionadas, encontramos números cromosómicos más altos: de $x = 13$ a $x = 16$. La tendencia a la reducción del número básico se ha observado ya en otros grupos de plantas superiores y es frecuente en la familia de las Compuestas.

El cuadro de la evolución que hemos esbozado es un cuadro ideal. La realidad es algo más imperfecta: en las Centaureíneas, la evolución que acabamos de pintar se ha producido de forma paralela en varias líneas independientes y en algunos grupos coexisten caracteres antiguos con otros modernos. Por ejemplo, *Aetheopappus pulcherrimus*, una especie de Armenia (bellísima, como bien dice su epíteto), es por muchos conceptos una centaureínea muy primitiva: tiene polen espinoso y carece del mecanismo de presentación de polen de los grupos más modernos. Sin embargo, las flores de la periferia del capítulo son tan estériles, radiantes y elaboradas como las de las especies modernas.



Por motivos obvios, no podíamos plantearnos estudiar las secuencias ITS de todas las especies del grupo. Por tanto, elegimos una serie de representantes de las cerca de 40 secciones en las que estaba clasificado, puesto que la clasificación seccional parecía razonablemente clara y tenía en cuenta bastante bien algunos aspectos de la filogenia del grupo que acabamos de explicar. Para este primer paso, nos quedamos con unas 45 especies, incluyendo unas cuantas del grupo de la vecina subtribu de las Carduíneas, que son el pariente más cercano, aunque primitivo.

El método que se usa para construir los árboles filogenéticos se basa en el principio cladístico de la máxima parsimonia. A grandes rasgos, viene a decir que la hipótesis filogenética más probable es la que requiere un menor numero de cambios en los caracteres. Recurrimos al programa PAUP, de análisis filogenético por parsimonia.

La filogenia que sugiere el análisis de las secuencias de la región ITS nos ha confirmado la hipótesis de partida: la evolución en las Centaureíneas ha seguido la línea que marcan, sobre todo, el tipo de polen (y su mecanismo asociado de presentación) y el número de cromosomas. También nos viene a demostrar que algunas de las tendencias evolutivas que hemos encontrado han aparecido de forma paralela en líneas distintas; sobre todo, la tendencia a desarrollar flores estériles grandes y llamativas en la periferia de los capítulos.

Después del éxito de este estudio, nuestro equipo ha incorporado a su panoplia de herramientas la secuenciación del ADN. Estamos absolutamente convencidos de su eficacia y de que en poco tiempo estudiar las secuencias del ADN será algo tan rutinario como contar las piezas florales o los cromosomas. No obstante, hay algo que quisiéramos dejar claro: ninguna técnica, ninguna herramienta, por potente y eficaz que sea, valdrá nada si no hay un conocimiento previo exhaustivo del grupo en el que se va a aplicar: hay que tener el criterio necesario para plantear los problemas, para elegir la técnica molecular más adecuada que puede ayudar a resolverlos, y para interpretar los resultados.

ALFONSO SUSANNA DE LA SERNA
Y NURIA GARCÍA JACAS
Instituto Botánico de Barcelona

RIP

Polivalencia de una proteína asesina

En 1978 Georgi Markov, famoso defensor de los derechos humanos, fue asesinado en una calle de Londres por agentes de la policía política búlgara mediante un pinchazo en la pierna con la punta de un paraguas. Markov falleció entre agudísimos dolores sin que se pudiese hacer nada para salvar su vida. ¿La causa? Una cantidad mínima de ricina en el remate de la sombrilla. Casi un siglo antes, en 1890, H. Stillmark había aislado una poderosa toxina de las semillas de ricino (*Ricinus communis* L.). Resultó ser una proteína y le puso el nombre de ricina. Hoy sabemos que se trata de una proteína inactivadora de ribosomas, constituida por dos cadenas polipeptídicas. El acróstico con que se la conoce evoca, quizás involuntariamente, su capacidad letal: RIP (del inglés *R*ibosome-*I*nactivating *P*rotein).

Aunque se ha observado que algunas RIP inactivan ribosomas de hongos, plantas y bacterias, propio de ellas es inactivar ribosomas de células animales, bloqueando de manera catalítica e irreversible la síntesis de proteínas de dichas células. Actúan a modo de *N*-glicosidasas y degradan cierta purina del ARN ribosómico 28S de la subunidad grande del ribosoma, con lo que incapacitan a estas partículas para cumplir su función de elongación de las cadenas polipeptídicas. En efecto, la diana de las RIP es siempre una adenina de un bucle del ARN ribosómico que participa en la interacción entre un factor de elongación y el ribosoma.

En razón de su estructura se distinguen tres grupos de RIP: las de tipo 1, 2 y 4. Las de primer tipo constan de una sola cadena polipeptídica; no son tóxicas porque no pueden atravesar la membrana plasmática de las células. Las RIP de tipo 2 están formadas por dos cadenas polipeptídicas, unidas entre sí por un puente disulfuro. De las dos, la cadena activa, o cadena A, inhibe la síntesis de proteínas y es equivalente a una RIP de tipo 1. La otra, la cadena de unión o cadena B, es una lectina capaz de unirse a glicoproteínas de la membrana plasmática de la célula y entrar en su interior por endocitosis arrastrando consigo a la cadena A. Esto explica la extraordinaria toxicidad de la mayoría de las RIP de tipo 2. Entre las exceptuadas se encuentran las RIP de tipo 2 del saúco (*Sambucus nigra* L.) y del yezgo (*Sambucus ebulus* L.), descubiertas en nuestro laboratorio de la Universidad de Valladolid; pese a estar constituidas por una cadena A y una cadena B no son tóxicas, debido probablemente a algún defecto en su cadena B que les impide acceder al citosol y actuar sobre los ribosomas de la célula

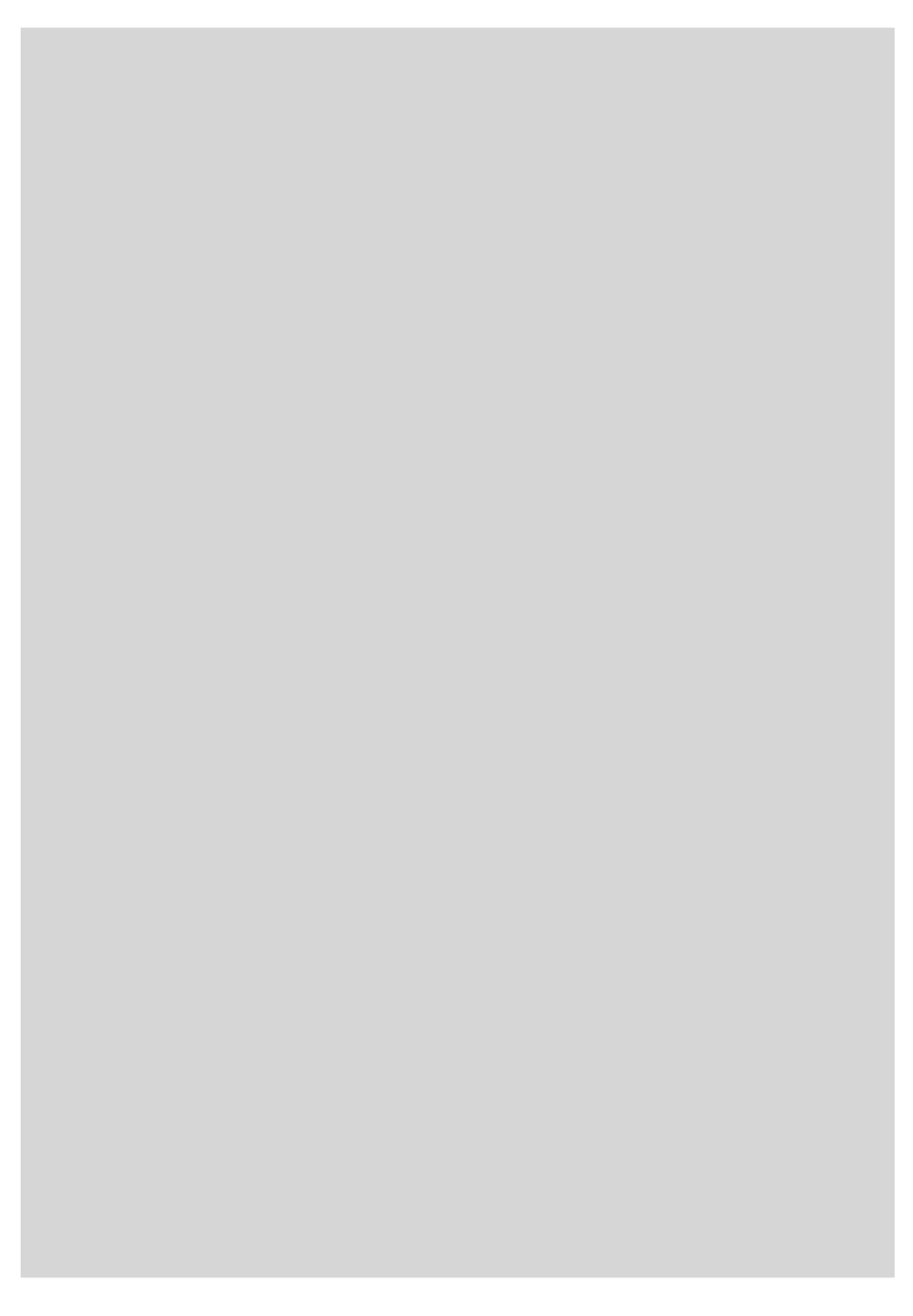
Las proteínas inactivadoras de ribosomas de tipo 4 están formadas por cuatro cadenas polipeptídicas. Más en particular, constan de dos dímeros equivalentes cada uno de ellos a una RIP de tipo 2, unidos por enlaces no covalentes.

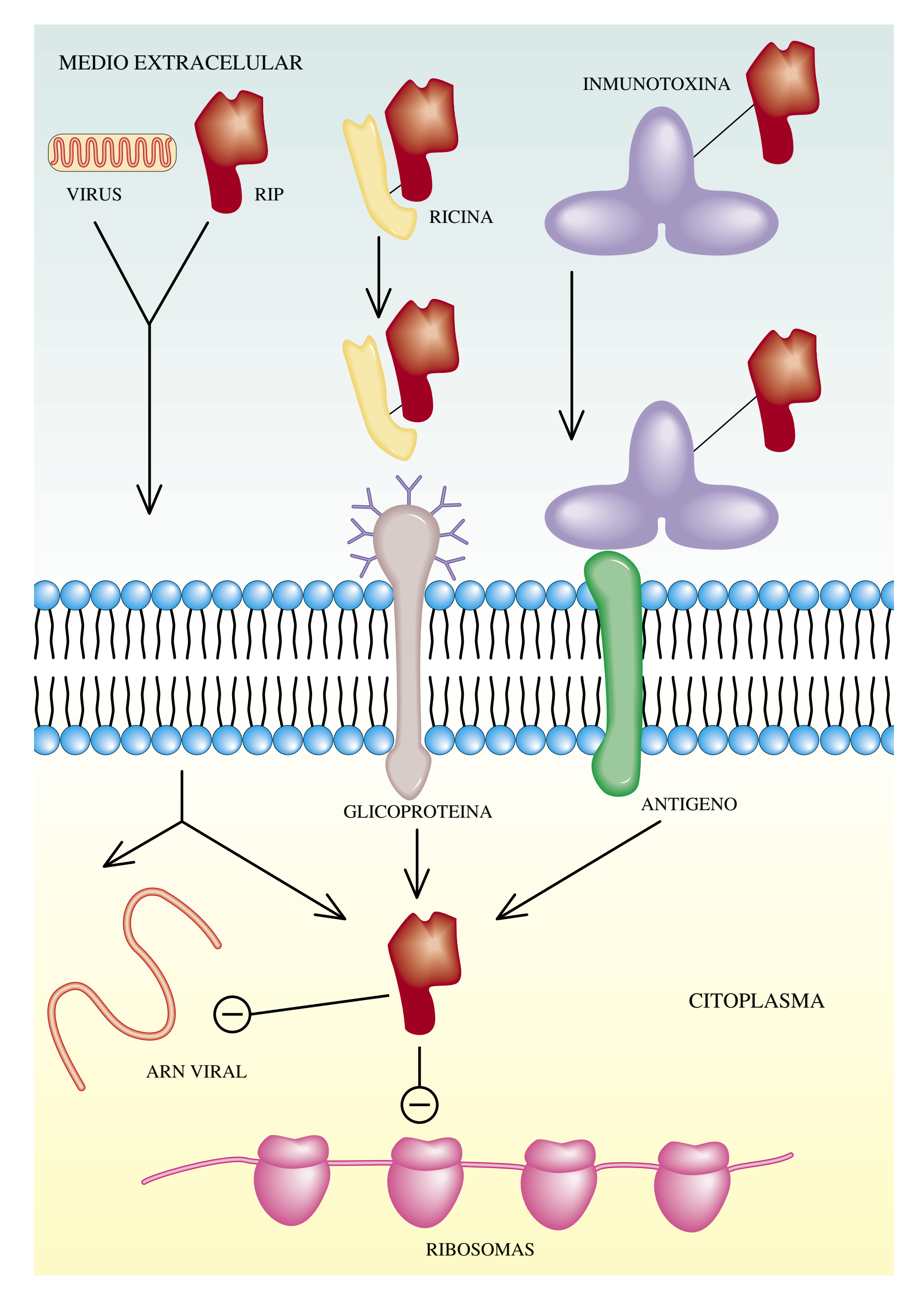
Las RIP se han encontrado sólo en especies vegetales y en alguna bacteria. Hasta la fecha se han aislado más de sesenta de tipo 1, nueve de tipo 2 y tres de tipo 4.

Se desconoce qué función exacta cumplen estas proteínas en los vegetales. Se ha hablado de su posible intervención en el sistema de defensa contra insectos, hongos o virus. En nuestro laboratorio hemos observado que la infección vírica induce la expresión de dos proteínas inactivadoras de ribosomas de tipo 1 en la remolacha (*Beta vulgaris* L.). Se obtuvo el mismo resultado tratando las hojas de remolacha con peróxido de hidrógeno o con ácido salicílico. Estos dos compuestos son mediadores moleculares de la resistencia sistémica adquirida (SAR) y su concentración en las plantas aumenta transitoriamente después de las infecciones víricas

También en nuestro laboratorio hemos visto que las RIP de la remolacha degradan el ácido ribonucleico del virus del mosaico del tabaco (TMV). La planta podría evitar la proliferación del virus mediante una "acción suicida" de las células infectadas que inactivarían sus propios ribosomas, con lo que se impediría la formación de nuevas partículas víricas. Cabría, asimismo, que las RIP actuaran directamente degradando la adenina en el ácido ribonucleico del virus. Tampoco se puede descartar una combinación de estos dos mecanismos y otros desconocidos.

Resulta patente el interés de las RIP en campos muy diversos, desde la obtención de plantas resistentes a infecciones víricas y fúngicas hasta la terapia del cáncer y el sida. Por lo que concierne a lo primero, se ha obtenido ya una planta de tabaco portadora de la RIP de la cebada que es resistente a hongos. La acción protectora de la RIP podría ser sinérgica con la protección ejercida por otras proteínas de defensa (qui-





Eliminación de células y virus mediante proteínas inactivadoras de ribosomas. Al penetrar, por una vía desconocida, en las células infectadas las RIP inhiben la propagación de los virus. Una vez que la RIP entra en la célula podría inactivar los ribosomas, inactivar el ARN vírico o ambas cosas a la vez. Las RIP de tipo 2, como la ricina, se introducen en la célula animal por endocitosis, después de unirse a una glicoproteína de la membrana plasmática. En el citoplasma, se libera la cadena A e inactiva los ribosomas provocando la muerte casi inmediata de la célula. De manera análoga, la inmunotoxina, al unirse a un antígeno específico de la membrana plasmática, penetra en las células tumorales y las mata

tinasas y glucanasas). También se han conseguido plantas de tabaco y patata que llevan el gen de la RIP de tipo 1 de *Phytolacca americana* L. Estas plantas se muestran resistentes ante un amplio espectro de virus vegetales.

Las RIP podrían participar en la preparación de inmunotoxinas o balas mágicas para la terapia del cáncer (inmunotoxiterapia del cáncer). Una inmunotoxina así sería la formada por un conjugado integrado por un anticuerpo monoclonal y una RIP. La misión del anticuerpo es reconocer específicamente un antígeno de la membrana plasmática de una célula cancerosa y provocar la entrada de la inmunotoxina en la célula por endocitosis. A la RIP compete inactivar los ribosomas de las células tumorales y provocar su muerte. Con ello se consigue eliminar células tumorales sin afectar a las sanas. Se han construido varios cientos de inmunotoxinas, normalmente con la cadena A de la ricina y en algunos casos con una RIP de tipo 1. Algunas se han ensayado en clínica para el tratamiento de distintos tipos de leucemia y tumores, con éxito variable dependiendo de la calidad de la inmunotoxina.

Se ha encontrado una ulterior aplicación de las RIP en el tratamiento del síndrome de inmunodeficiencia adquirida (sida). Varias de esas proteínas inhibidoras bloquean la propagación del virus de la inmunodeficiencia humana (HIV-1). La RIP podría entrar en los linfocitos arrastrada por la internalización del virus a través de un mecanismo que se desconoce; una vez dentro de la célula, podría matarla e impedir así la propagación del virus, depurinar el ARN o el ADN copia del virus o bien inhibir la integración del ADN del virus en el ADN del linfocito o macrófago. En ensayos clínicos acometidos en el Hospital General de San Francisco con pacientes afectados de sida se ha empleado tricosantina o GLQ223, una RIP de tipo 1 que se obtiene de *Trichosanthes kirilowii* (cucurbitácea procedente de China); los resultados obtenidos son esperanzadores.

José Miguel Ferreras Rodríguez
Tomás Girbés Juan
Departamento de Bioquímica y Biología Molecular
Facultad de Ciencias
Universidad de Valladolid

Ulcera péptica

¿Desaparece?

Enfermedad apenas conocida en el siglo XIX, la úlcera péptica ha sido una de las entidades clínicas con mayor repercusión médica, social y económica en los últimos 60 años. Hasta mediados de los setenta, el quirófano era la única opción eficaz para muchos pacientes. Los nuevos fármacos mejoraron el panorama a partir de 1976. Ahora puede curarse la úlcera con un tratamiento médico sencillo y de corta duración.

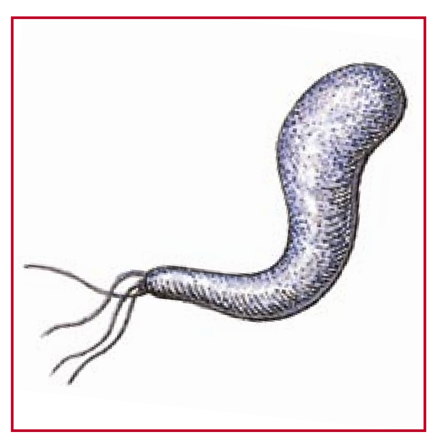
Localizada sobre todo en duodeno y estómago, la úlcera péptica es una

lesión de la mucosa digestiva que aparece en zonas sometidas a la acción fisiológica del ácido. Esta lesión, crónica y con períodos de actividad e inactividad, se correlaciona con una serie de síntomas clínicos, el más importante de los cuales es el dolor. Alrededor de la cuarta parte de las veces se producen complicaciones, como una hemorragia digestiva, porque la úlcera afecta a un vaso, o una perforación, porque atraviesa toda la pared intestinal.

Los estudios epidemiológicos y experimentales sugerían que el tabaquismo, los antiinflamatorios no esteroideos y determinados factores genéticos podrían influir en la etiología, pero ésta ha permanecido desconocida. Se relacionaba con el estrés, pero no existe ninguna confirmación sólida de esta asociación. Ningún factor de la dieta se ha podido relacionar con la lesión. Fisiopatológicamente el factor más estudiado ha sido la secreción ácida: de hecho la lesión aparece siempre en territorios del aparato digestivo bañados por ácido. Varias líneas de prueba abonaban la importancia del ácido: no existe úlcera sin ácido, en las enfermedades con gran hipersecreción de ácido se producen casi siempre úlceras y las terapias que reducen la secreción ácida —médicas o quirúrgicas— cicatrizan la lesión. Sin embargo, la úlcera se encuentra también en personas con secreción ácida normal, y fármacos que no modifican la secreción ácida, como el sucralfato, cicatrizan también la úlcera. Parece lógico inferir que el papel del ácido es fundamental, pero sólo permisivo, y que, sin otros factores, por sí mismo no es lesivo salvo en circunstancias extremas.

En los años setenta se produjeron varios avances significativos. En cuanto al diagnóstico, se generalizó el uso de la endoscopia digestiva. Gracias a ello se observó, por ejemplo, el carácter asintomático de muchas úlceras. En cuanto al tratamiento, la aparición de antesecretores eficaces y en la práctica inocuos (primero los agentes antihistamínicos selectivos H2, y luego los inhibidores de la bomba de protones de la célula parietal) facilitó el control de los síntomas de la enfermedad, evitando con su administración continua las alternativas quirúrgicas.

Durante los años ochenta se comenzó a prestar atención a un aspecto fundamental: la úlcera puede ser resultado de fallos del sistema de reparación, que se pone en marcha en cualquier tejido lesionado del organismo. Estos mecanismos que reclaman la intervención de diversas células y substancias, en particular de los factores de crecimiento, pueden ser claves en la génesis y el mantenimiento de la lesión. El efecto nocivo del ácido podría explicarse por su oposición a la acción de algunos de estos factores, como puso de manifiesto el grupo de Folkman en Boston, con el FGF-β (factor de crecimiento fibroblástico).



Bacteria H. pylori

Esta línea de investigación parecía clave porque daba coherencia y sentido a los fragmentarios conocimientos fisiopatológicos. Así, el ácido acetilsalicílico puede bloquear la cicatrización de las úlceras pépticas a través de su efecto sobre las plaquetas, que liberarían menor cantidad de PDGF (factor de crecimiento plaquetario) en el lecho lesional, como han demostrado Lanas y Hirschowitz, de la Universidad de Alabama. Otros grupos, como el de Halter en Suiza o el de Tarnawski en Estados Unidos, han profundizado en diversos aspectos del proceso de cicatrización, importantes no sólo en la úlcera péptica, sino también en las lesiones de cualquier otro tejido, y de forma relevante en los procesos tumorales.

En este contexto una simple observación de un médico residente de medicina interna, Barry J. Marshall, supuso el inicio de un cambio espectacular en nuestro enfoque de la enfermedad. Tras apreciar en 1982 en las biopsias del antro gástrico formas de aspecto bacteriano, en lugar de reputarlas simples contaminantes (durante decenios se había considerado imposible que las bacterias sobrevivieran de modo estable en el inhóspito ambiente ácido del estómago normal) comprobó que se asociaban a la presencia de patología (gastritis). Más adelante, y con la ayuda de Price, consiguió cultivar la bacteria, que primero se denominó *Campylobacter pyloridis* y hoy conocemos como *Helicobacter pylori*. A partir de la publicación en *The Lancet* de estos hallazgos se ha producido un vertiginoso acúmulo de nuevos datos. La infección por *Helicobacter* causa gastritis, es el factor causal más importante (si bien no el único, y probablemente no suficiente) de la úlcera péptica y se asocia con el adenocarcinoma y el linfoma gástrico. *Helicobacter pylori* es, sin duda, la estrella de la patología gastrointestinal superior en estos momentos.

Cuando se cura la infección, lo que puede conseguirse con las combinaciones adecuadas de fármacos en tan sólo 7 días, la úlcera no sólo cicatriza, sino que no recidiva en la gran mayoría de los casos. Este cambio es tan radical, que la mayor resistencia para su difusión adecuada es la incredulidad de muchos clínicos, que se niegan a aceptar esta posibilidad, hasta que comprueban personalmente los hechos. Por contra los más optimistas opinan que la úlcera péptica es una enfermedad con los años contados, y que en no poco tiempo encontrar un enfermo con úlcera será una rareza clínica, puesto que la infección por *Helicobacter* puede curarse y en el futuro podrá prevenirse; y, sin duda, se desarrollarán antiinflamatorios sin poder ulcerógeno en los próximos años.

Paradójicamente, el descubrimiento de un tratamiento médico tan eficaz puede hacer que la úlcera péptica desaparezca antes de que la comprendamos. ¿Por qué sólo un grupo de personas infectadas desarrollan una úlcera? ¿Por qué aparece en una zona anatómica y no en otra? ¿Cuáles son los mecanismos que explican que la úlcera cicatrice y no reaparezca cuando no existe infección? ¿Cómo producen úlceras los antiinflamatorios? Son sólo algunas de las preguntas sin contestar que exigen respuesta. Esperemos que una menor importancia clínica no evite que los investigadores sigan profundizando en la úlcera péptica, una enfermedad todavía llena de interrogantes.

FERNANDO GOMOLLÓN
Médico adjunto, Servicio de Aparato Digestivo
Hospital Miguel Servet, Zaragoza

De cerca

Bernard Chaubet

Un parásito muy paciente de la mantis religiosa



1. ***Mantibaria mantis*** **anclada bajo las alas de la mantis.**



2. **Puesta de** ***Mantibaria mantis*** **en la ooteca en formación.**

Los fenómenos de parasitismo resultan asombrosos por la finura y sagacidad de las adaptaciones del parásito a su huésped. El talón de Aquiles de la *Mantis religiosa*, depredadora temible, es su progenie, a pesar del cuidado que pone en protegerla. La mantis hembra deposita sus huevos en una ooteca, que confecciona segregando un líquido que se solidifica en contacto con el aire (*a la derecha*). Empero, esta cápsula protectora no fragua con la rapidez suficiente para que los huevos de la mantis queden al abrigo de todos los peligros, porque ciertos himenópteros consiguen efectuar su puesta en los huevos de la mantis recién rebozados.

La estrategia de uno de estos parásitos, *Mantibaria mantis*, es el colmo de la paciencia. La hembra de *Mantibaria*, que mide unos 2,5 milímetros, busca una mantis adulta y se instala en ella, resguardándose bajo sus alas (*abajo, a la izquierda*). Comienza entonces para la pasajera clandestina una vida sedentaria que va a durar varios meses. La alas, inútiles, las pierde.

Esta tozuda espera cesa con las primeras contracciones abdominales de la mantis, cuando va a empezar su puesta. El himenóptero desciende entonces por su huésped y accede al fluido que baña los huevos, que aún permanece en estado semilíquido (*abajo, a la izquierda*). Dispone para efectuar su puesta de una a dos horas, hasta el endurecimiento de la ooteca. Pese al riesgo de quedar inmersa en ella, va arrastrando su abdomen hasta que descubre un huevo: allí deposita el suyo. La larva de *Mantibaria* madurará a expensas del huevo de la mantis. Son varios los huevos parasitados. El parásito corre el riesgo de quedar preso en la viscosa envoltura, porque los movimientos abdominales de la mantis son amplios, y sus sacudidas, fuertes. Si sobrevive a la empresa, ascenderá otra vez por el cuerpo de la anfitriona y volverá a resguardarse… a la espera de una nueva puesta.



Control de ordenadores por señales neurales

Los impulsos eléctricos procedentes de nervios y músculos pueden dar órdenes directas a los ordenadores, auxiliando así a los que sufren limitaciones físicas

Hugh S. Lusted y R. Benjamin Knapp



En una película de ciencia ficción muy popular por los años cincuenta, unos exploradores espaciales llegaban desde la Tierra a un lejano planeta en el que perduraban vestigios de una civilización muy adelantada. En aquel remoto lugar todavía funcionaba un computador. Los visitantes humanos pudieron comunicarse con él por medio de aparatosas sondas craneales que transmitían directamente pensamientos y sentimientos a través de enlaces neurales.

El tema se ha repetido hasta la saciedad en otras obras futuristas. La mente humana se acopla a un ordenador y basta con un simple pensamiento para que la máquina responda, a semejanza del reconocimiento de la voz por ordenadores que hoy es práctica común. Este reconocimiento del pensamiento constituiría una última frontera del ordenador en la que éste se comportaría como una prolongación del propio sistema nervioso.

HUGH S. LUSTED y R. BENJAMIN KNAPP llevan diez años de colaboración. Lusted se doctoró en la facultad de medicina de la Universidad de Stanford en 1980 y estudió regeneración de nervios en la de Londres. A su regreso a Stanford contribuyó al desarrollo de una implantación coclear electrónica. Conoció entonces a Knapp, graduado en la Universidad de Carolina del Norte y más tarde doctorado en Stanford. Lusted y Knapp fundaron en 1989 Biocontrol Systems.

La técnica de la computación ha avanzado mucho en estos últimos cuarenta años, pero construir un enlace neural versátil entre el cerebro humano y la máquina electrónica sigue siendo una empresa titánica. Con todo, vale la pena proseguir las tentativas de unión del sistema nervioso a circuitos electrónicos externos, ya que ello nos permitiría comunicar con los ordenadores sin ningún esfuerzo. Para las personas aquejadas de graves atrofias neuromusculares, que carecen de acceso a los ordenadores y apenas se relacionan con el mundo exterior, ello supone un avance increíble.

En el último decenio hemos trabajado para conseguir este control "sin manos" de los ordenadores. Hoy día los enlaces neurales pueden ya satisfacer algunas necesidades, y esperamos que pronto se encontrarán nuevas maneras de dominar la técnica. Con algo de imaginación y una comprensión clara del camino recorrido hasta los logros actuales es posible trazar un cuadro de lo que el futuro puede ofrecernos.

El cuerpo eléctrico

Hace más de un siglo que se reconoce la naturaleza eléctrica del sistema nervioso, base del control neural directo de los ordenadores. En 1849, Emil Heinrich Du Bois-Reymond detectaba las minúsculas descargas eléctricas provocadas al contraer los músculos del brazo. Para sus observaciones se valió de un galvanómetro, un primitivo medidor de tensiones. Du Bois-Reymond adhirió a su cuerpo los hilos del instrumento utilizando trozos de papel secante impregnado en solución salina, que mantendrían la resistencia eléctrica de la conexión en el mínimo. Pero pronto se dio cuenta de que la piel actuaba como una barrera para las señales eléctricas generadas en la masa muscular interior. Por ello no vaciló en abrirse una herida en cada brazo, arrancarse la piel e introducir los electrodos de papel en las propias llagas. Du Bois-Reymond pudo entonces captar señales eléctricas unas treinta veces más intensas que las obtenidas a través de la piel intacta.

Sobre estas primeras investigaciones se ha desarrollado una técnica que hoy permite observar las contracciones musculares. Con electrodos de cloruro de plata y amplificadores electrónicos muy sensibles pueden



1. LA SELECCION EN UN MENU de ordenador suele exigir la manipulación de un teclado o un ratón. Pero también los discapacitados físicos pueden enviar órdenes a su ordenador. Heather Black, aquejada de parálisis cerebral aguda, puede manejar un ordenador fijando la mirada en uno de los cuadros que destellan en la pantalla. Los electrodos fijados a su cabeza recogen las señales evocadas por los destellos; la temporización de los impulsos identifica la elección hecha.

registrarse los débiles impulsos musculares, incluso después de atravesar la piel. En los años setenta se comenzó a aprovechar este fenómeno en investigaciones clínicas para el diseño de prótesis mecanizadas capaces de obedecer a contracciones musculares. Por otro lado, también se observó que los impulsos eléctricos procedentes de fibras musculares activas podían ayudar a personas incapaces de mover algunos miembros por causa de enfermedad o heridas; para ello basta con colocar electrodos junto a músculos que no estén afectados. Por este camino, hasta los individuos con minusvalía profunda pueden manejar equipos electrónicos con las señales generadas por los músculos (las señales electromiográficas, o EMG, cuyo nombre proviene del registro sobre papel de tales impulsos).

La cuestión no se reduce a adherir sensores EMG a la piel de la persona y conectar los hilos a un ordenador corriente. Se requieren circuitos y programas informáticos especializados para analizar e interpretar las configuraciones de impulsos musculares. Con miras a ayudar a otros investigadores en este terreno, hemos diseñado un equipo que sirve de interfaz entre el ordenador y las señales eléctricas del cuerpo. Le hemos puesto el nombre de Biomusa.

La traducción de los impulsos musculares en una forma más adecuada para el tratamiento por ordenador digital comienza con la amplificación de las señales primarias detectadas por los electrodos, multiplicando por un factor aproximado de 10.000 la tensión de las mismas. Otros circuitos convierten luego en formato digital las señales EMG amplificadas. Tras un extenso procesamiento de estas señales digitalizadas, el ordenador




2. LOS MUSCULOS DEL BRAZO de Dawn Parkot, que sufre parálisis cerebral, generan señales eléctricas que puede detectar el ordenador. Bajo la banda negra que ciñe su brazo izquierdo, unos electrodos captan las minúsculas fluctuaciones de tensión que se alteran cuando los grupos de fibras musculares comienzan a contraerse. Ante un ordenador que representa estas señales biológicas, esta alumna de ingeniería de la Universidad Notre Dame aprende a variar la actividad muscular de su antebrazo desde un nivel bajo (*izquierda*) a un nivel alto (*derecha*).

puede determinar cuándo y en qué medida se contraen las fibras musculares próximas a los electrodos. De esta manera, la actividad muscular puede dirigir la operación de un ordenador personal, tal como lo haría un ratón o puntero de rótula.

Ciertos sistemas de control de ordenadores mediante señales musculares han demostrado su gran valía para las personas discapacitadas. David J. Warner, del hospital clínico de la Universidad de Loma Linda en California, conectó en 1993 los electrodos de nuestro aparato EMG al rostro de un niño de 10 años completamente paralizado del cuello para abajo, a consecuencia de un accidente de automóvil. Tensando ciertos músculos faciales, el niño desplazaba objetos en la pantalla del ordenador —la primera vez desde el accidente que podía mover sin ayuda objetos de su entorno.

Pero los discapacitados físicos no son los únicos que pueden aprovecharse de las ventajas de controlar ordenadores por señales musculares. Con el ratón EMG "manos-libres" que estamos ensayando puede ajustarse la posición del cursor sobre la pantalla contrayendo los músculos del antebrazo, por ejemplo, lo que permite mover el cursor sin levantar del teclado las manos.

Posibilidades insospechadas

Otro enfoque del control de ordenadores por señales biológicas depende de un fenómeno eléctrico del cuerpo humano totalmente distinto: la diferencia de potencial entre retina y córnea. En efecto, la retina, donde reside la máxima actividad metabólica del ojo, presenta una tensión ligeramente negativa con respecto a la de la córnea. En cierto modo, el ojo actúa como una débil batería eléctrica. Pueden detectarse por circuitos electrónicos las minúsculas variaciones de tensión producidas en el rostro de una persona cuando cambia la orientación de sus ojos. Tales impulsos se denominan señales electrooculográficas (EOG, del nombre dado a sus registros en papel).

Durante decenios, la medición de las señales EOG ha constituido un apropiado indicador del movimiento ocular en diversos estudios fisiológicos. En 1953, Nathaniel Kleitman, de la Universidad de Chicago, y Eugene Aserinsky, de la facultad de medicina Jefferson en Filadelfia, utilizaron señales EOG con que registrar el movimiento ocular durante ciertas fases del sueño. En estos períodos la actividad cerebral era intensa, similar a la del estado de vigilia; hablamos del sueño REM, de rápido movimiento ocular ("rapid-eye-movement").

Si bien la EOG se había utilizado anteriormente como un simple registro del movimiento ocular general, al final de los ochenta parecía factible que las mediciones del potencial córneo-retiniano indicaran también la dirección de la mirada de la persona. Disponiendo convenientemente los electrodos, las tensiones EOG variarán proporcionalmente a la rotación del ojo en un margen de 30 grados a partir del centro. Hacia 1990 varios grupos informaron de haber logrado mover así el cursor de un ordenador. Pero los escépticos siguieron sosteniendo que el "ruido" eléctrico originado por los cambios graduales de tensión entre los electrodos (la "deriva electródica") haría impracticable este procedimiento para todo lo que no fuese una demostración de laboratorio.

Conseguimos por fin descubrir un modo de eliminar la interferencia y construir un dispositivo práctico para el control de los ordenadores. Para lograr tal resultado seguimos el mismo sistema que habíamos empleado a propósito de la detección de señales musculares, pero esta vez configuramos el aparato como monitor de señales EOG. Igual que en el procesamiento de EMG, el analizador EOG comienza por amplificar y digitalizar las tensiones recogidas en varios electrodos (un par de electrodos acusa los movimientos verticales del ojo y otro par los horizontales). Seguidamente, el sistema aplica lógica borrosa para discriminar entre el movimiento real del ojo y la deriva del electrodo.

Por medio de este equipo, cualquier persona puede controlar de manera fiable un ordenador con el movimiento de los ojos, por ejemplo, colocando el cursor en diversos puntos de la pantalla. Existen otras técnicas de seguimiento de la mirada que utilizan rayos infrarrojos o cámaras de vídeo. Pero tales alternativas resultan ser mucho más costosas que el equipo EOG, el cual brinda la posibilidad de manejar ordenadores por movimiento ocular a un mayor número de personas, y particularmente a los discapacitados.

En 1991, Warner probó en Loma Linda nuestro sistema de seguimiento

ocular para ayudar a una niña que había sufrido una grave lesión en la médula espinal. Dada su corta edad en el momento del accidente, los médicos temieron que las limitaciones físicas de la criatura comprometieran su desarrollo mental. Con una banda EOG especial ajustada en la cabeza y colocada frente a un monitor de vídeo, la niña de 18 meses pronto descubrió que podía desplazar un icono (una cara sonriente) a través de la pantalla sin más que mover los ojos, e intuitivamente comprendió, sin que nadie se lo explicara, la manera de controlar la pantalla.

Otras instituciones dedicadas a la rehabilitación de víctimas de la parálisis han utilizado equipos semejantes asociados a un programa especial de "teclado visual". Presenta éste en pantalla un teclado mecanográfico normal. Valiéndose únicamente del movimiento de los ojos, el operador selecciona letras entre las teclas representadas en la pantalla. Si bien el proceso de formación de palabras es lento, las personas adiestradas pueden (con ayuda de ciertos programas refinados) completar muchas frases, incluso documentos enteros, mediante una continua sucesión de miradas.

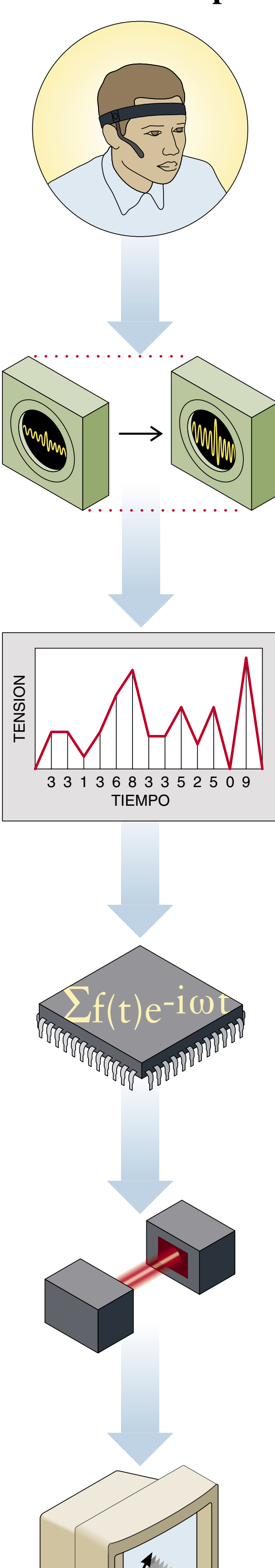
Tan seguro es el seguimiento de la mirada de una persona a través de las señales EOG, que hay varios intentos de integrar este mecanismo en otros sistemas. Nosotros hemos colaborado con clínicos de la Universidad de Stanford en el desarrollo de un sistema para el ajuste de las cámaras de fibra óptica que se utilizan en cirugía endoscópica (control remoto de operaciones en el interior del cuerpo). Nuestro aparato EOG permite que el cirujano cambie, moviendo los ojos, el campo visual de la cámara, al tiempo que mantiene las manos ocupadas en otros instrumentos quirúrgicos.

Control cerebral

Los dispositivos que detectan señales EMG o EOG han logrado enlazar personas con máquinas para un sinnúmero de aplicaciones, pero en todos los casos el proceso se apoya en las débiles tensiones de origen biológico generadas en músculos u ojos. ¿Sería posible establecer una conexión neural sin tales intermediarios? Se ha conseguido controlar de un modo rudimentario ordenadores sirviéndose de la actividad eléctrica inherente al cerebro mismo.

No es ningún descubrimiento que el cerebro produce señales eléctricas susceptibles de medida. En 1929 Hans

Componentes del sistema Biomusa



USUARIO
La persona que utiliza el sistema para traducir los impulsos biológicos a comandos de ordenador debe ceñirse en la cabeza o el brazo una banda especial. En el interior de la banda se alojan electrodos que detectan a través de la piel las señales eléctricas generadas en los ojos o los músculos.

AMPLIFICADOR
Hay que empezar por amplificar varios miles de veces la intensidad de las debilísimas señales que detectan los electrodos. La principal dificultad técnica estriba en que, si no se adoptan ciertas precauciones, pueden amplificarse también los ruidos eléctricos que las acompañan. Corrientemente se utiliza un amplificador diferencial, que sólo amplifica las diferencias de tensión entre dos puntos. Esto da buen resultado, pues la mayoría de las fuentes de ruido eléctrico tienden a afectar por igual a todas las señales. Por tanto, la diferencia entre tensiones de electrodos no sufre alteración.

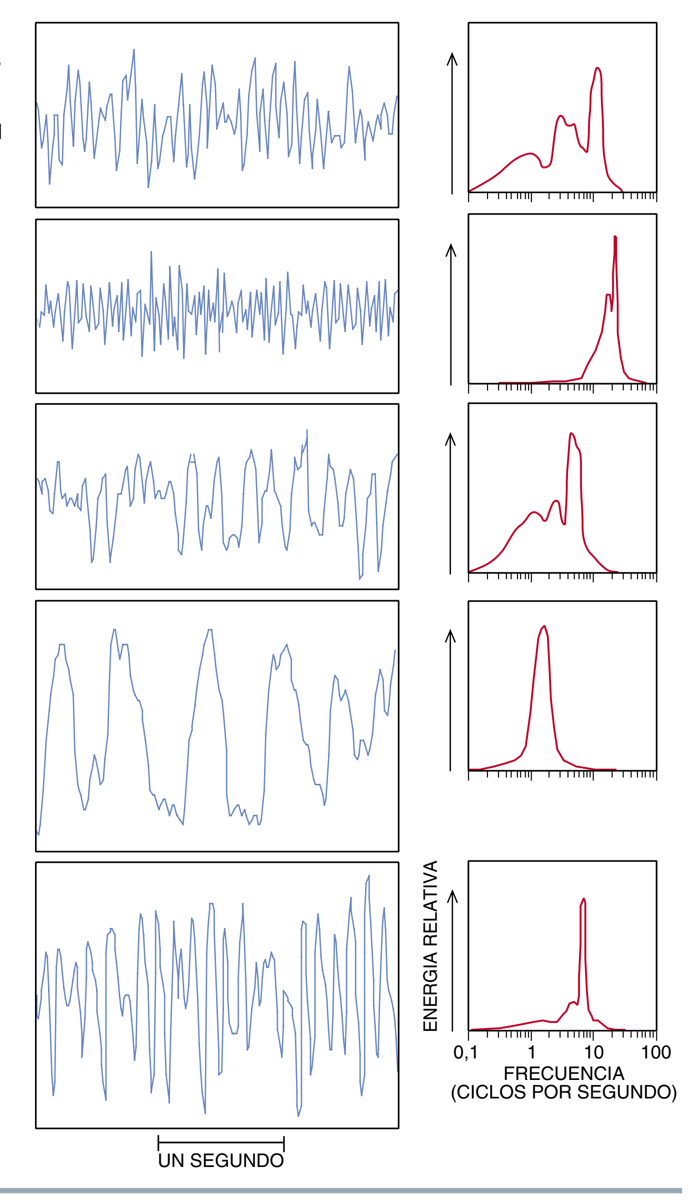
CONVERSOR ANALOGICO-DIGITAL
Las tensiones amplificadas deben traducirse en un formato que pueda interpretar el ordenador. Para conseguirlo, un circuito especializado llamado conversor analógico-digital muestrea la señal entrante a un ritmo de 4000 veces por segundo. A continuación, convierte los niveles de tensión en series de números. Es tal la precisión de esta conversión, que el error introducido por la traducción al formato digital se limita a una pequeña fracción porcentual de los niveles de señal típicos.

PROCESADOR DE SEÑAL DIGITAL
El procesador de señal digital es una pastilla similar en muchos aspectos a los circuitos integrados que actúan como unidades centrales de procesamiento en los ordenadores personales. Los procesadores de señal digital están, sin embargo, diseñados para realizar con flexibilidad y eficiencia ciertos cálculos numéricos. En este sistema, extraen las características importantes de la sucesión de números que reciben del conversor de analógico en digital, y dentro de ese tren de datos reconocen configuraciones determinadas. Después, utilizan estos resultados para reconocer qué músculos han generado las señales eléctricas originales.

AISLAMIENTO OPTICO
Para cubrir el riesgo de descargas eléctricas que siempre conlleva la conexión de electrodos fijados sobre la piel a un aparato de alta tensión (ordenador, en este caso), es preciso tomar precauciones. Para ello se interrumpe el trayecto eléctrico en un punto, en el cual la señal eléctrica se transforma en señal óptica y se transmite a través de una corta distancia. Este enlace óptico intercalado deja pasar la señal sin obstáculos, pero reduce enormemente la posibilidad de descargas nocivas.

ORDENADOR PERSONAL
En el ordenador personal se representan las señales detectadas y procesadas por los demás componentes del sistema. Obedeciendo a las señales eléctricas generadas por movimiento de los ojos o contracciones musculares, el ordenador puede hacer funcionar otro ordenador o un dispositivo electrónico independiente. También permite un fácil ajuste de los controles del sistema, incluidos el nivel de amplificación global y las acciones específicas del procesador de señal digital.

Un surtido de ondas cerebrales



Berger acuñó el término "electroencefalograma", en abreviatura EEG, para describir el registro de las fluctuaciones de tensiones en el cerebro captadas por unos electrodos fijados al cuero cabelludo. Estas señales EEG proceden de la corteza cerebral, una capa de varios centímetros de espesor de tejido neuronal lleno de circunvoluciones. Los neurólogos creen que el origen de las tensiones EEG está en las células piramidales de esta corteza. Cada una de dichas neuronas constituye un diminuto dipolo eléctrico, cuya polaridad depende de que la entrada de la red a la célula sea de inhibición o de excitación. De ahí que la apretada capa de células piramidales produzca una configuración de actividad eléctrica en constante variación a medida que cambian los impulsos nerviosos. Las mediciones efectuadas en el cuero cabelludo pueden detectar las configuraciones eléctricas interiores, pero con la atenuación y el desenfoque introducidos por el paso a través del cráneo.

Hace ya decenios que se investigan las correlaciones entre las diversas señales EEG y los comportamientos o sensaciones particulares. Con los resultados de esos estudios se ha ido dibujando poco a poco un mapa funcional de la corteza cerebral. Hoy es posible personalizar las pruebas EEG colocando los electrodos en la parte de cuero cabelludo situada directamente sobre la fuente de la actividad que se desea observar. Con miras a utilizar esta actividad eléctrica para el manejo de un ordenador, ciertos expertos han intentado aislar señales EEG específicas que el sujeto pueda ajustar a su albedrío. Por desgracia, las señales eléctricas del cerebro se resisten al control. Lo que suele hacerse es medir continuamente una diversidad de señales EEG y eliminar por filtrado las componentes indeseadas.

El análisis de las señales EEG continuas, u ondas cerebrales, es en sí mismo una ciencia, con su propia nomenclatura intrincada. Las diferentes ondas, al igual que las numerosas estaciones radioeléctricas, se caracterizan por la frecuencia de sus emisiones o, en ciertos casos, por la morfología de las ondas. Hay cinco tipos importantes.

Las ondas alfa son las de frecuencias comprendidas entre 8 y 13 hertz y pueden crearse fácilmente por acciones tan sencillas como el cerrar de ojos. Acostumbran ser bastante intensas, pero su amplitud disminuye cuando la persona recibe un estímulo luminoso, se concentra en imágenes vívidas o intenta otros esfuerzos mentales. Se llama ondas beta (típicamente entre 14 y 30 hertz) a las que se asocian a un estado de alerta, pudiendo alcanzar frecuencias próximas a los 50 hertz si la actividad mental es intensa. Las ondas theta (de 4 a 7 hertz) se originan por una tensión emocional, especialmente por frustración o decepción. Durante el sueño profundo se producen ondas delta, de frecuencias inferiores a 3,5 hertz. Por último, las ondas mu parecen ir asociadas con la corteza motora; disminuyen con el movimiento o la intención de moverse.

Casi todas las tentativas de controlar un ordenador por mediciones continuas de EEG se basan en la observación de ondas alfa o mu, ya que es posible aprender a cambiar la amplitud de estos dos ritmos mediante un esfuerzo mental apropiado. La persona puede lograr tal resultado recordando, por ejemplo, una imagen que le estimule intensamente o elevando su nivel de atención.

A lo largo de los últimos diez años, Jonathan R. Wolpaw y Dennis J. MacFarland, del Centro de Salud Wadsworth de Albany, han enseñado a los pacientes a controlar la amplitud de sus ondas mu por representación de la sonrisa, la masticación, la deglución y otras actividades motoras. Con suficiente práctica, los pacientes aprendieron a manipular un cursor que estaba programado para desplazarse obedeciendo a las variaciones de amplitud que se medían en las ondas mu.

3. LAS COMPOSICIONES musicales interpretadas por Atau Tanaka dependen solamente de las señales musculares. Los electrodos alojados en los dos brazaletes del compositor detectan unas señales que hacen funcionar un ordenador, y éste a su vez controla diversos instrumentos electrónicos.



También hemos experimentado con ondas cerebrales. En 1987 configuramos uno de nuestros equipos Biomusa para que funcionase como monitor de EEG y actuara sobre un sintetizador musical. El resultado fue una demostración espectacular de las posibilidades de esta técnica. Preparamos el sistema para la detección de ráfagas de actividad en ondas alfa, que pueden provocarse deliberadamente distrayendo la atención, por ejemplo. Este equipo es un conmutador electrónico activado por el cerebro; cualquier persona puede accionarlo, aunque sufra graves limitaciones físicas.

Como ilustración, citaremos el desarrollo de un equipo similar para un paciente brasileño inmovilizado por una esclerosis lateral amiotrófica avanzada (enfermedad de Lou Gehrig). Para formar palabras, utiliza nuestro conmutador de ondas alfa y un ordenador personal dotado de una programación especial de teclado visual. El proceso es laborioso, puesto que el paciente sólo puede responder sí o no, y a veces necesita hasta seis iteraciones para concentrar la búsqueda en una sola tecla. Sin embargo, ahora cuenta con una ayuda electrónica que le permite comunicarse, capacidad vital que había perdido por completo.

Otras personas discapacitadas utilizan con éxito un segundo tipo de aparato medidor de ondas cerebrales, que observa lo que se llama el potencial evocado del cerebro, o EP (del inglés "evoked potential"). La señal EP se produce en respuesta a ciertos estímulos —tales como un fuerte ruido o un destello de luz— al cabo de una pequeña fracción de segundo de haber sido éstos provocados. Varios investigadores han utilizado el método de detección de EP para controlar los ordenadores con la actividad eléctrica del cerebro. En particular, Erich E. Sutter, del Instituto Smith-Kettlewell de Investigación Oftalmológica de San Francisco, ha desarrollado un sistema que permite a los discapacitados físicos seleccionar palabras o frases de un menú formado por cuadros que destellan en la pantalla de un ordenador. Sosteniendo durante uno o dos segundos la mirada fija en el cuadro apropiado, una persona conectada por electrodos craneales puede transmitir su elección al ordenador. La máquina observa la forma y la temporización de la respuesta EP y discrimina así cuál de los destellos codificados ha producido la actividad eléctrica evocada en el cerebro. El ordenador puede, entonces, captar la palabra o frase escogida entre todo el grupo presentado en la pantalla.

Al igual que Sutter, el grupo de Grant MacMillan, de la Base Aérea Wright-Patterson en Dayton, experimentan con señales EP y esperan que puedan servir de ayuda a los pilotos militares, una vez que hayan sido adiestrados en modificar a su antojo las señales EP. Los pilotos contarán, pues, con un mecanismo auxiliar de control aproximado, que podrán accionar incluso cuando tengan manos y pies ocupados en el pilotaje.

Futuras conmociones

Aunque es claro que los procesos mentales del cerebro van acompañados de una intensa actividad eléctrica, las fluctuaciones de tensión detectadas en el cuero cabelludo sólo permiten reconocer unas pocas de las configuraciones correspondientes. Por ejemplo, han sido muy raros los éxitos en la identificación del conjunto de ondas que el cerebro emite de modo coherente cuando la persona piensa en algo tan concreto como una palabra o una letra del alfabeto. Pero tal vez podrían lograr esta hazaña unos sistemas más avanzados, capaces de desentrañar las complejas ondas cerebrales.

Es muy difícil valorar las posibilidades de controlar ordenadores con señales neurales, dado que este campo de investigación todavía está en pañales. Se ha conseguido un gran progreso al aprovechar la potencia de los ordenadores personales para realizar las rápidas operaciones que exige el reconocimiento de las configuraciones de impulsos biológicos. Prosigue la búsqueda de nuevas señales que puedan ser aún más útiles que las captadas hasta ahora. Se están distribuyendo nuevos programas informáticos capaces de sacar mayor partido de la velocidad y refinamiento del equipo de computación moderno.

Si los adelantos del siglo venidero mantienen el ritmo de los últimos decenios, la comunicación neural directa entre personas y ordenadores podrá alcanzar finalmente su madurez y generalización. Quizás algún día los nuevos ordenadores se compren con sensores de señales biológicas incorporados, como hoy se integran el teclado y el ratón. En tal caso, lo que quizá no sospechen los fanáticos del ordenador es que este método de controlar sus máquinas se debe al esfuerzo de un puñado de investigadores y a la resolución de un grupo de voluntarios discapacitados, allá en la última década del siglo veinte.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AN EEG-BASED BRAIN-COMPUTER INTERFACE FOR CURSOR CONTROL. J. R. Wolpaw, D. J. McFarland, G. W. Neat y C. A. Forneris en *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 78, n.º 3, págs. 252-259; marzo de 1991.

BIOCONTROLLERS FOR THE PHYSICALLY DISABLED: A DIRECT LINK FROM NERVOUS SYSTEM TO COMPUTER. R. B. Knapp y H. S. Lusted en *Virtual Reality and Persons with Disabilities: Proceedings*. Dirigido por H. J. Murphy. Universidad del Estado de California, 1992.

COMMUNICATION TECHNOLOGY FOR DISABLED PERSONS. Erich E. Sutter en *Handbook of Amyotrophic Lateral Sclerosis*. Dirigido por Richard Alan Smith. Marcel Dekker, 1992.

MEDICAL INSTRUMENTATION, APPLICATION AND DESIGN. Dirigido por John G. Webster. Houghton Mifflin, 1992.

Rozamiento a escala atómica

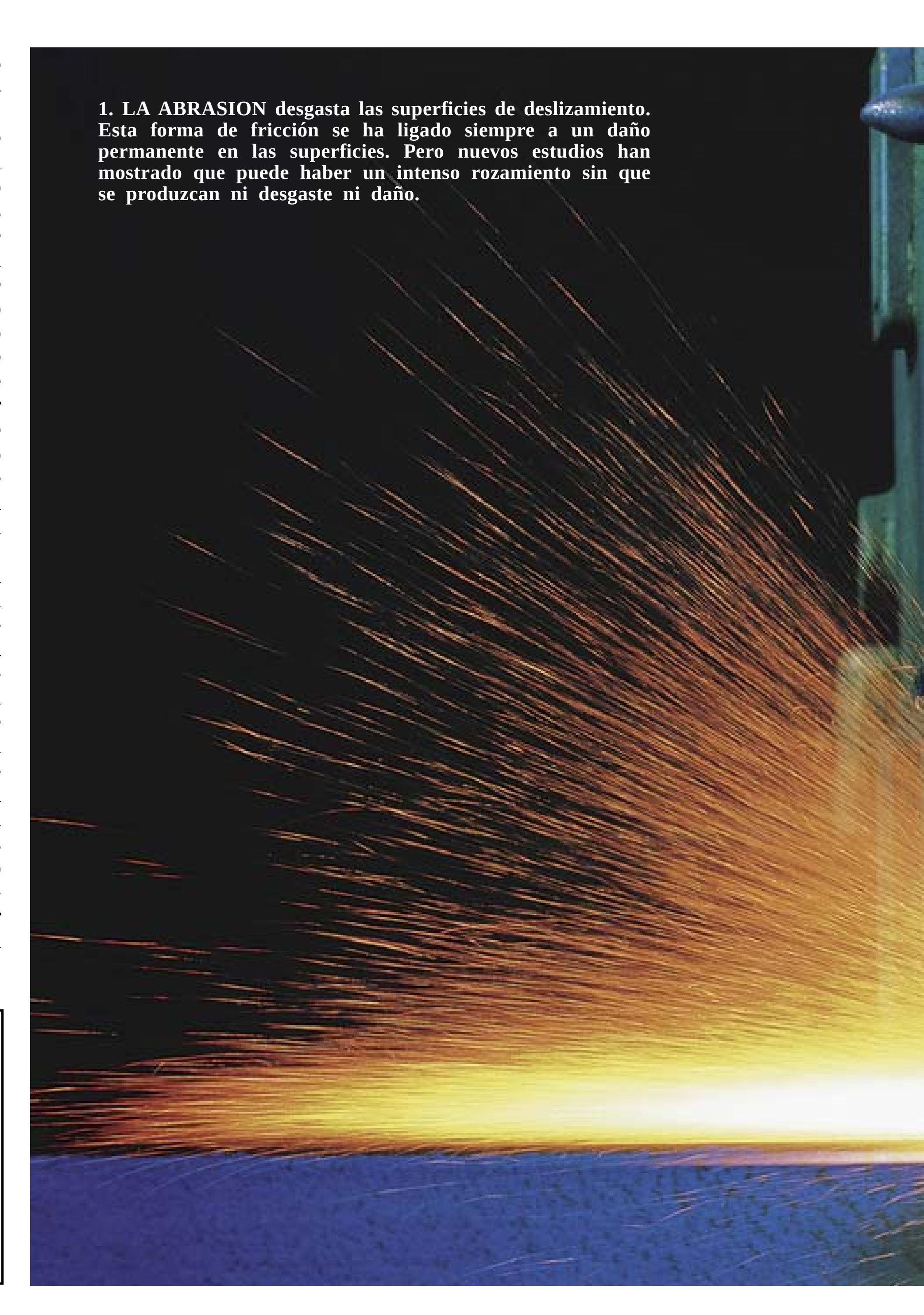
La nanotribología, el estudio del origen atómico del rozamiento, que los físicos habían venido ignorando, indica que esa fuerza nace de fuentes inesperadas, la energía del sonido entre ellas

Jacqueline Krim

Comencé a angustiarme conforme se acercaba la primera semana de diciembre. No se trataba, por supuesto, de la oscuridad ni de la llovizna de Boston que precede a la nieve. Esos días terminaba el plazo para remitir los resúmenes de las contribuciones al congreso anual de marzo de la Sociedad Norteamericana de Física, *el* congreso de la física de la materia condensada. Mi compañero Allan Widom y yo habíamos creado en 1986 una técnica experimental que medía la fuerza de rozamiento que una película de un átomo de espesor sufre al deslizarse sobre una superficie sólida plana. Pero no encontraba yo dónde clasificar mi resumen sobre la fricción a escala atómica en la miríada de categorías temáticas de la reunión de marzo.

No es que no se investigase el rozamiento. Siempre se me había recibido bien en las sesiones dedicadas a la fricción macroscópica o la ciencia nanométrica de la multidisciplinaria Sociedad Norteamericana del Vacío. Si embargo, a la corriente principal de la física no parecía entusiasmarle el tema. Casi unánimemente, se atribuía el origen del rozamiento a algo que tuviera que ver con la rugosidad de las superficies. Siendo un fenómeno tan universal, y considerada su importancia económica, cabría esperar un mayor interés. (De acuerdo con

JACQUELINE KRIM, profesora de física de la Universidad del Nordeste y miembro de su centro de investigaciones interdisciplinarias sobre sistemas complejos, se licenció en la Universidad de Montana y doctoró en la de Washington. Ha presidido la Sociedad Norteamericana del Vacío y hoy pertenece a la junta ejecutiva de su división de ciencia de las superficies.



1. LA ABRASION desgasta las superficies de deslizamiento. Esta forma de fricción se ha ligado siempre a un daño permanente en las superficies. Pero nuevos estudios han mostrado que puede haber un intenso rozamiento sin que se produzcan ni desgaste ni daño.

las estimaciones, si se les prestase mayor atención al rozamiento y el desgaste los países desarrollados se ahorrarían hasta el 1,6 por ciento de sus productos nacionales brutos, nada menos que 116.000 millones de dólares en los Estados Unidos, sólo en 1995.)

La verdad es que no estaba sola en mi empeño. A finales de los años ochenta aparecieron, como la mía, muchas técnicas nuevas para estudiar la fuerza de fricción experimentalmente, deslizando átomos sobre sustratos cristalinos, o teóricamente mediante nuevos modelos computarizados. La primera vez que llamé a esta especialidad "nanotribología" —la fricción, o la tribología, estudiada en geometrías nanométricas bien definidas— fue en una publicación de enero de 1991. El término hizo pronta fortuna. La que fuera actividad de una comunidad de investigadores aislados dejada de la mano de Dios acabó convertida en disciplina científica por propio derecho.

Desde entonces, los nanotribólogos han venido descubriendo con regularidad diferencias notables entre la fricción a escala atómica y la observada macroscópicamente. El rozamiento tiene muy poco que ver con la rugosidad microscópica de la superficie, y hay veces que el deslizamiento es mejor en una superficie seca que en otra humedecida. La fuerza es tan compleja, que aunque caractericemos a la perfección la interfaz de deslizamiento, no sabremos con exactitud qué pasará en ella. Si pudiésemos determinar de forma precisa el estado de cosas que media entre los contactos microscópicos y los materiales macroscópicos, lograríamos quizá, y gracias a ese mejor conocimiento del rozamiento, lubricantes superiores o piezas mecánicas más resistentes al desgaste.

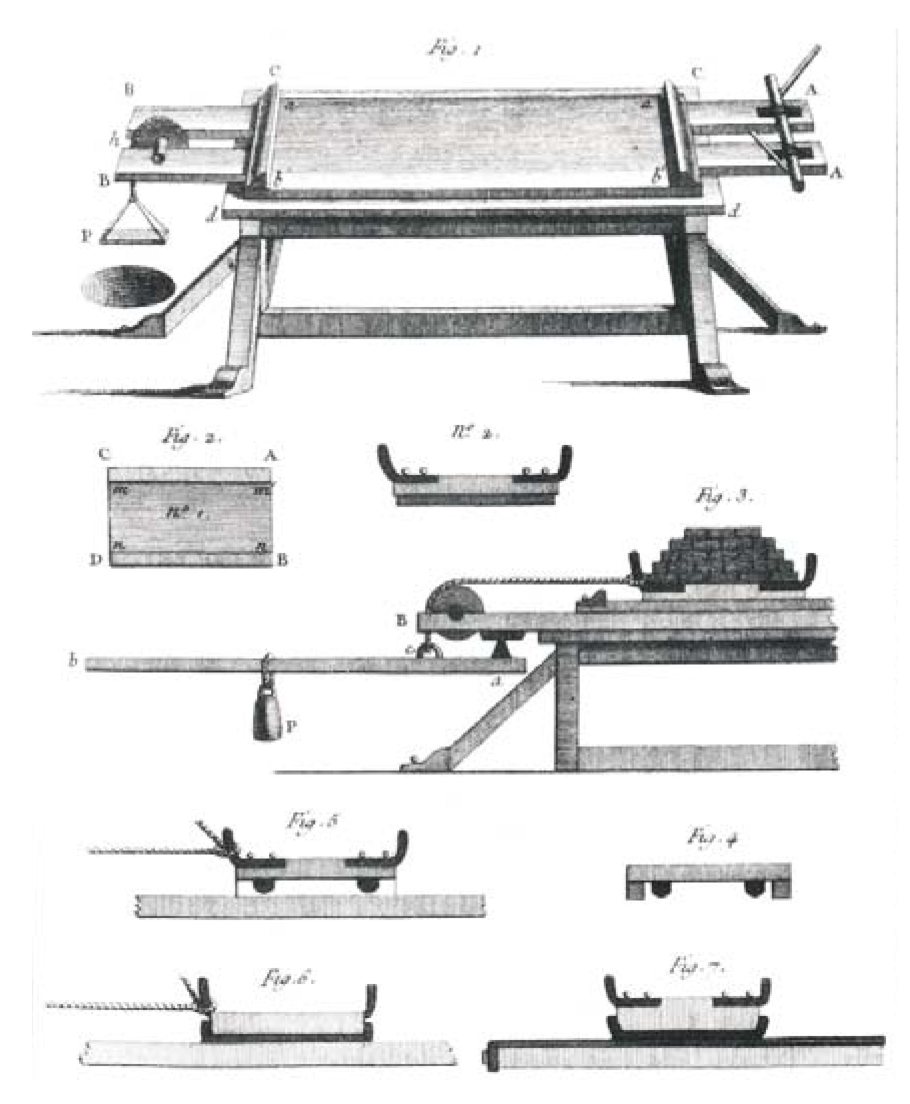


Por esas mismas razones técnicas se ha querido conocer bien la fricción desde tiempos prehistóricos. Los homínidos, nuestros antepasados, de Argelia, China y Java ya la usaban hace cuatrocientos mil años cuando tallaban sus útiles de piedra. Doscientos mil años antes de Cristo, los neandertales tenían un buen dominio de la fricción y hacían fuego frotando maderas o golpeando pedernales. En Egipto se produjo un progreso importante hace 5000 años: el transporte de grandes bloques y estatuas de piedra para la construcción de las pirámides requirió un avance tribológico, las cuñas de madera lubricadas.

Los clásicos

Puede que la tribología moderna empezase hace 500 años, cuando Leonardo dedujo las leyes que gobiernan el movimiento de un bloque rectangular que se desliza sobre una superficie plana. (La obra de Da Vinci no dejó huella histórica, sin embargo, porque sus cuadernos de notas no se publicaron hasta cientos de años después.) Guillaume Amontons, físico francés, redescubrió en el siglo XVII las leyes del rozamiento estudiando el deslizamiento en seco de dos superficies planas.

Las conclusiones de Amontons forman parte ahora de las leyes clásicas del rozamiento. En primer lugar, la fuerza de fricción que se opone al deslizamiento en una interfaz es proporcional a la "carga normal", o fuerza total que apriete las superficies. En segundo, quizás en contra de lo que la intuición esperaría, la magnitud de la fuerza de fricción no depende del área aparente de contacto. Un bloque pequeño que se deslice por una superficie experimentará tanta fricción como uno mayor que pese lo mismo. A estas reglas



2. LOS PRIMEROS ESTUDIOS DE LA FRICCION, como los que en el siglo XVIII hizo el físico francés Charles-Augustin de Coulomb, sirvieron para que se definieran las leyes clásicas de la fricción; se intentó explicar esta fuerza basándose en la rugosidad de las superficies, pero ahora se ha descartado que ésta sea una fuente importante.

suele añadirse una tercera, que se atribuye al físico francés del siglo XVIII Charles-Augustin de Coulomb, más conocido por sus trabajos sobre la electrostática: una vez ha empezado el movimiento, la fuerza de rozamiento es independiente de la velocidad. No importa a qué velocidad se impulse un bloque, la resistencia que sufrirá será casi la misma.

Las leyes clásicas de la fricción de Amontons y Coulomb han perdurado mucho más que los diversos intentos de explicarlas a partir de un principio fundamental, la rugosidad superficial, por ejemplo, o la adhesión molecular (la atracción entre las partículas de las superficies enfrentadas). A mediados de los años cincuenta ya se había descartado la rugosidad superficial de entre los mecanismos viables del rozamiento. Los fabricantes de automóviles, y no sólo ellos, habían descubierto, para su sorpresa, que la fricción entre dos superficies es a veces menor si una de ellas es más rugosa. Más aún, puede aumentar si se alisan las dos superficies. En la soldadura por presión en frío, por ejemplo, los metales muy pulidos se pegan firmemente.

Se creía, en cambio, que la adhesión molecular era una opción mucho más prometedora, gracias sobre todo al ingenioso trabajo de F. P. Bowden, David Tabor y sus colaboradores de la Universidad de Cambridge. Vieron que el rozamiento, aunque independiente, como dijo Amontons, del área de contacto aparente macroscópica, era proporcional al área real de contacto. Es decir, las irregularidades microscópicas de las superficies se tocan y unas se introducen en las otras. La suma de todos estos puntos de contacto constituye el área real de contacto. Habiendo establecido que había algún tipo de vínculo íntimo entre la adhesión y la fricción, el grupo de Cambridge supuso que ésta se debía básicamente a ligaduras adhesivas en los puntos reales de contacto, tan fuertes que sin cesar se arrancaban fragmentos minúsculos.

Pero esta explicación era errónea. Simplemente, no podía justificar que hubiese una fricción considerable incluso en casos de desgaste despreciable. Bajo la supervisión del propio Tabor, un brillante alumno de doctorado, Jacob N. Israelachvili, creó en los años setenta un "aparato de fuerzas superficiales" adecuado para mensurar la fricción a escala atómica, y halló claras pruebas de un rozamiento sin desgaste. Estas mediciones dejaron a Tabor perplejo acerca de cuál podría ser la causa de la fricción.

El aparato de Israelachvili explora los contactos lubricados entre superficies uniformes de mica. Se basa en la lisura atómica de la mica: al exfoliarla se obtienen superficies que incluyen áreas atómicamente planas de hasta un centímetro cuadrado, una distancia de más de 10 millones de átomos. (Las superficies corrientes sólo son planas en distancias de 20 átomos y los metales lisos no pasan de los 300 átomos.) Cuando se tocan dos superficies de mica se forma una interfaz libre de simas o montes atómicos (de "asperezas"). En el aparato se pegan, por lo general, los reversos de las superficies de mica a unos semicilindros cruzados que pueden moverse en las dos direcciones del plano horizontal. Para medir el área de contacto, los investigadores irradian un haz de luz coherente que cruza el hiato y estudian el efecto óptico resultante, un patrón de interferencia consistente en una serie de bandas oscuras e iluminadas. Las deformaciones de los muelles conectados a los semicilindros indican la fuerza de rozamiento.

Gracias a los aparatos de fuerzas superficiales se verificó la deducción macroscópica de que el rozamiento era proporcional a la superficie real de contacto. Pero pasarían casi veinte años antes de que Israelachvili, ya profesor titular de la Universidad de California en Santa Bárbara, determinase cuál era el escurridizo vínculo que ligaba la fricción a la adhesión. Con sus colaboradores, descubrió que el rozamiento no guardaba correlación con la intensidad del vínculo adhesivo. Por contra, el rozamiento iba de la

mano de la “irreversibilidad” adhesiva, o la cuantía en que difiere el comportamiento de las superficies cuando se pegan entre sí en comparación con su respuesta cuando proceden a su mutua separación. Pero el grupo no podía abordar cuál era el mecanismo físico explícito que daba lugar a la fricción que medían.

James A. Greenwood, de la Universidad de Cambridge, autoridad mundial del contacto tribológico de las superficies rugosas, resumió la situación en 1992 con estas palabras: “Si alguien inteligente explicase por qué existe la fricción y es proporcional al área [real] de contacto, nuestro problema estaría resuelto.”

En sintonía

Pocos podrían aspirar mejor a ser ese alguien que Gary M. McClelland, del centro de investigación que la compañía IBM tiene en Almadén. En los años ochenta concibió un modelo muy sencillo de rozamiento sin desgaste basado en las vibraciones de las redes atómicas. McClelland ignoraba que G. A. Tomlinson, del Laboratorio Británico Nacional de Física, lo había publicado ya en 1929, y Jeffrey B. Sokoloff y sus colaboradores de la Universidad del Nordeste lo habían retocado en 1978. Pero estos trabajos habían merecido escasa atención.

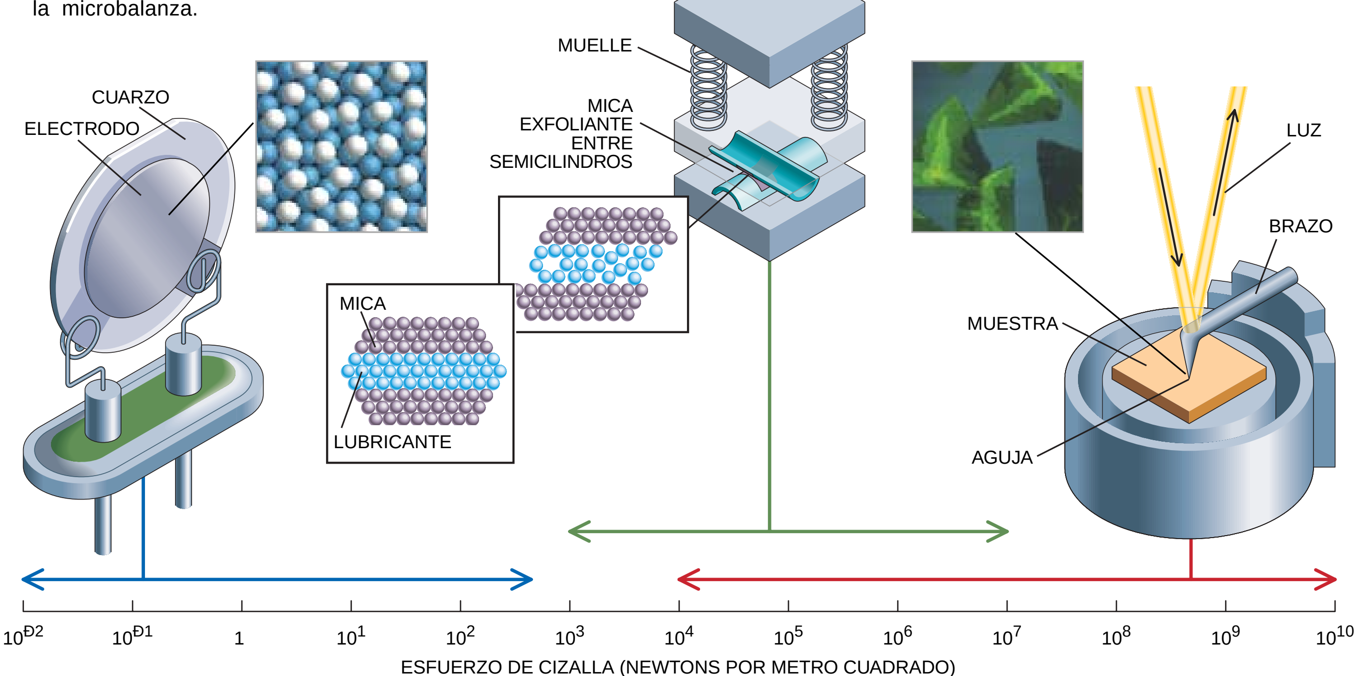
La fricción derivada de las vibraciones de la red atómica se produce cuando los átomos cercanos a una de las superficies ponen en movimiento a los de la otra. (Las vibraciones, ondas de sonido, reciben el nombre de fonones.) De ese modo, parte de la energía mecánica necesaria para que una superficie se deslice sobre la otra se convierte en energía sonora. Esta acaba por transformarse en calor. Para que el deslizamiento no cese, hay que añadir más energía mecánica y, por tanto, empujar con más fuerza.

La cantidad de energía mecánica que se transforma en ondas de sonido depende de la naturaleza de las sustancias que se deslicen. Los sólidos se parecen mucho a los instrumentos musicales en el sentido de que sólo pueden vibrar a determinadas frecuencias; por consiguiente, la cantidad de energía consumida dependerá de qué frecuencias se exciten. Si este “punteo” de los átomos de una de las superficies enfrentadas resuena con alguna de las frecuencias propias de la otra, se produce rozamiento. Si no es así, no se generan ondas sonoras. Queda de esa forma abierta la apasionante posibilidad de que haya sólidos, lo bastante pequeños y sin demasiadas frecuencias resonantes, que exhiban un deslizamiento carente casi por completo de rozamiento.

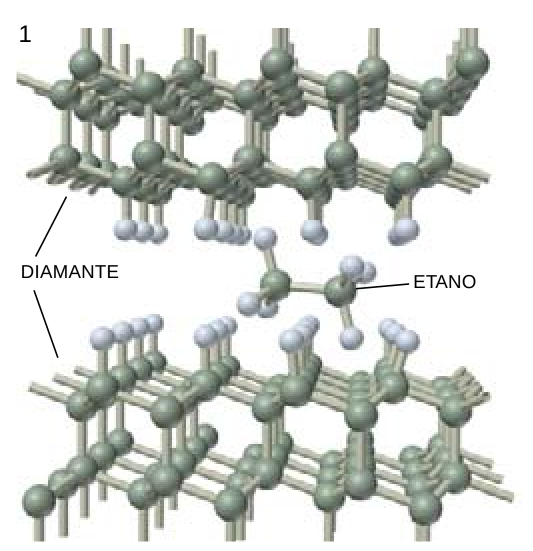
LA MICROBALANZA DE CRISTAL DE CUARZO mide el rozamiento entre su electrodo y una capa de material de un espesor de sólo un átomo o dos depositada sobre el electrodo. Los cambios de las propiedades vibracionales del cuarzo indican el grado en que se desliza la capa depositada sobre la superficie que está debajo de ella. Las simulaciones por ordenador de capas deslizantes, de una capa líquida de criptón (*en blanco en el cuadro*), por ejemplo, sobre oro (*azul*), sirven para confirmar los hallazgos de la microbalanza.

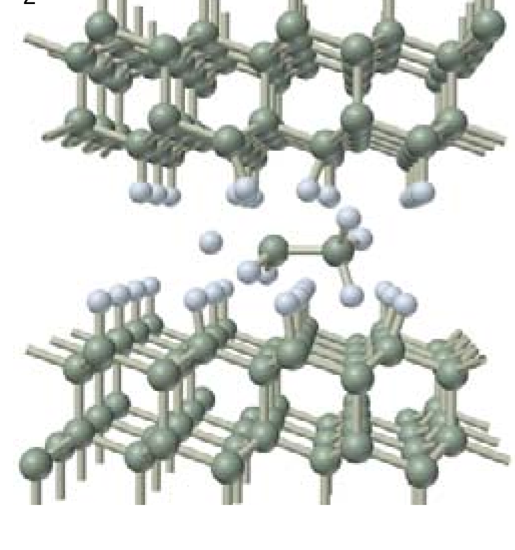
EL APARATO DE FUERZAS SUPERFICIALES se vale de dos superficies de mica exfoliada, las más lisas que se conocen. Se aplican películas lubricantes, cuyo espesor puede no ser de más de unas moléculas, entre las superficies de mica, y se hace que éstas deslicen para observar la forma en que las películas condicionan el deslizamiento (*cuadros*).

EL MICROSCOPIO DE FUERZA LATERAL es una variación del microscopio de fuerza atómica. Se sirve de una fina aguja montada en un brazo. La punta va desviándose mientras se arrastra sobre la superficie de la muestra. La luz que se refleja en la punta indica el grado de desviación, y mide así el rozamiento entre la punta y la superficie. Los investigadores han utilizado el microscopio para empujar “islas” de carbono 60 (*cristales verdes en el cuadro*) a lo largo de una superficie de sal.



3. EL ESFUERZO DE CIZALLA, la fuerza por unidad de área real de contacto necesaria para mantener el deslizamiento de un objeto sobre otro, es una medida de la fricción que se ha investigado con varios instrumentos. Entre todos ellos se ha registrado un intervalo de esfuerzos que abarca 12 órdenes de magnitud, siempre en geometrías experimentales sin rozamiento, deterioro de las superficies y rugosidad.





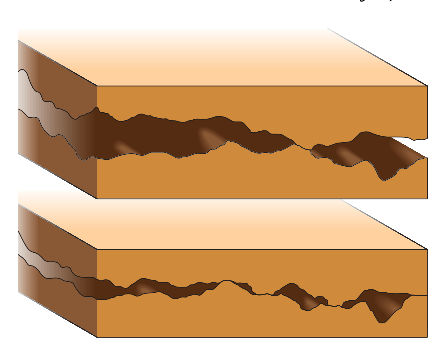
4. PUEDE HABER REACCIONES químicas entre dos superficies deslizantes. En esta representación una molécula de etano, compuesta de dos átomos de carbono (*verde*) y seis de hidrógeno (*azul*), está emparedada entre dos superficies de diamante, terminadas con átomos de hidrógeno (*1*). Cuando las superficies se deslizan, el etano pierde un átomo de hidrógeno (*2*) y se convierte en un radical etilo. A

En cualquier caso, McClelland, emocionado por la posibilidad teórica de un deslizamiento no sólo sin desgaste sino además casi sin fricción, se puso, con su colega C. Mathew Mate y otros, manos a la obra. Para medir el rozamiento nanométrico adaptaron un instrumento que acababa de inventarse: el microscopio de fuerza atómica. Con él, publicaron en 1987 sus primeras observaciones de la fricción medida átomo a átomo. Su artículo marcó un hito.

El microscopio de fuerza atómica consta de una punta afilada que se monta en el cabo de un brazo flexible. A medida que barre una muestra de superficie, las fuerzas que actúan sobre la punta desvían el brazo. Varios medios eléctricos y ópticos (condensadores, interferencias) cuantifican las desviaciones horizontales y verticales. El microscopio detecta fuerzas de fricción, adhesión y carga externa de hasta sólo un piconewton, o 10-12 newton. (Un piconewton viene a ser al peso de una mosca lo que el peso de una mosca es al peso de una personal normal.) A principios de los años noventa, los investigadores de IBM habían ya instalado su microscopio de fuerza de fricción en vacíos ultraaltos; de esa forma pudieron estudiar el deslizamiento de una punta de diamante sobre una superficie de diamante cristalina con un área de contacto de menos de 20 átomos de envergadura.

Las mediciones de McClelland y sus colegas arrojaron una fuerza de rozamiento que no dependía de la carga normal. Según las leyes clásicas del rozamiento ello tendría que haber supuesto una fricción nula. Pero no sólo resultaba evidente que no lo era, sino que el esfuerzo de cizalla, o fuerza por área necesaria para mantener el deslizamiento, era enorme: mil millones de newton, unos cien millones de kilos, por metro cuadrado. Una fuerza así rompería el acero más resistente. Cada vez estaba más claro que, aun cuando se conociese la naturaleza atómica del contacto deslizante, nuestra capacidad de predecir la fuerza de fricción en él sería insignificante.

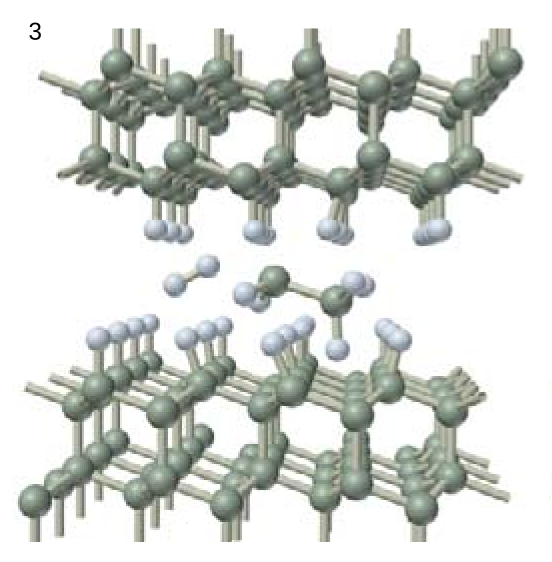
Hasta la fecha, entre todos los nanotribólogos han observado un amplio intervalo de esfuerzos de cizalla, de los 0,01 newton a los 10.000 millones de newton por metro cuadrado. Por ejemplo, Roland Lüthi, Ernst Meyer y sus colaboradores del Instituto de Física de la Universidad de Basilea han inducido "islas" de buckminsterfullereno ("buckybolas", o carbono 60) de una molécula de espesor a lo largo de una superficie cristalina de sal con la punta, cuyo tamaño se acerca al de un átomo, de un microscopio de fuerza atómica modificado. Hallaron esfuerzos de cizalla de 10.000 a 100.000 newton por metro cuadrado, varios órdenes de magnitud inferiores a los que se dan en lubricantes sólidos macroscópicos, como el polvo de grafito. (El esfuerzo de cizalla parece tan grande sólo porque se mide sobre un metro cuadrado de área real de contacto, que es en general varios órdenes de magnitud menor que el área aparente. Cuando se lubrica con grafito una cerradura, la misma área aparente de contacto es ya muy pequeña y el rozamiento real, bastante bajo.) Se ha medido, además, la fuerza que se necesita para que la punta se deslice sobre la parte superior de la isla de buckybola, y se ha hallado que es más "adhesiva" que la sal.

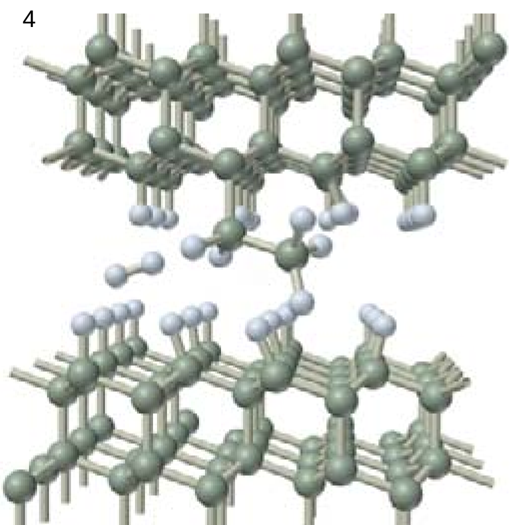


5. EN LOS PUNTOS DE CONTACTO se produce la fricción entre dos superficies rugosas que deslizan una sobre la otra (*arriba*). Si la "carga normal" —la fuerza que las aprieta— aumenta, el área total de contacto aumenta (*abajo*). Es este aumento lo que gobierna el grado de rozamiento, y no la rugosidad de la superficie.

En mi propio laboratorio hemos observado esfuerzos de cizalla varios órdenes de magnitud menores mediante una microbalanza de cristal de cuarzo, dispositivo que ha servido durante décadas para pesar muestras de sólo unos nanogramos. Consta de un cristal de cuarzo que oscila establemente a alta frecuencia (de 5 a 10 millones de veces por segundo). Depositamos electrodos de película metálica sobre sus superficies y, a continuación, condensamos sobre los electrodos películas de un solo átomo de espesor de un material diferente. La condensación sobre la microbalanza rebaja la frecuencia, y proporciona así una cifra del grado en que las partículas de la película siguen el paso de la agitación del sustrato de cuarzo infrayacente. Cuanto menor sea la amplitud final de la vibración, mayor será la fricción resultante de la acción de "frotamiento" de la película que se desliza sobre el sustrato.

Hoy en día, la microbalanza de cuarzo es el único aparato experimental que funciona en tiempos





continuación el hidrógeno libre retira del diamante un átomo de hidrógeno, al que se enlaza, formándose una molécula de gas hidrógeno (*3*). El radical etilo acaba por quedar ligado químicamente a una de las superficies de diamante (*4*). El diagrama se basa en las simulaciones por ordenador de Judith A. Harrison y sus colaboradores de la Academia Naval de los Estados Unidos.

tan cortos que pueda registrar la manera en que el rozamiento a escala atómica depende de la velocidad. La tercera ley clásica decía que la fricción es independiente de la velocidad, pero se vio que no es cierto. (El propio Coulomb lo sospechaba; no pudo probarlo.) Por ejemplo, para desacelerar uniformemente un automóvil y pararlo sin sacudidas, el conductor debe ir soltando el freno en los momentos finales, lo que muestra que la fricción crece cuando la velocidad es menor. Esta dependencia macroscópica de la velocidad se atribuye casi siempre a cambios en los puntos microscópicos de contacto (que llegan a fundirse a grandes velocidades de deslizamiento e incrementan su área a velocidades bajas; a ellas son "arrancados" más despacio y disponen de más tiempo para formar ligaduras). Ahora bien, para una geometría en la que el área de contacto permanezca fija, la de una microbalanza de cuarzo, por ejemplo, la fricción se comportará al revés: crecerá en proporción directa a la velocidad de deslizamiento. Nosotros confirmamos recientemente esta observación con películas sólidas, de un átomo de espesor, que se deslizaban sobre superficies cristalinas de plata y oro.

Deslizamiento en seco

Pero las teorías analíticas no predijeron nuestro sorprendente descubrimiento de 1989: las películas de criptón se deslizaban mejor secas sobre las superficies cristalinas de oro. Observamos que las fuerzas de rozamiento para las películas líquidas quintuplicaban las involucradas en películas sólidas; los esfuerzos de cizalla eran, para éstas, minúsculos, de sólo 0,5 newton por metro cuadrado con velocidades de deslizamiento de un centímetro por segundo. Resultaba tan contrario a lo que cabía intuir, que retuve más de un año en el cajón el artículo sobre el tema.

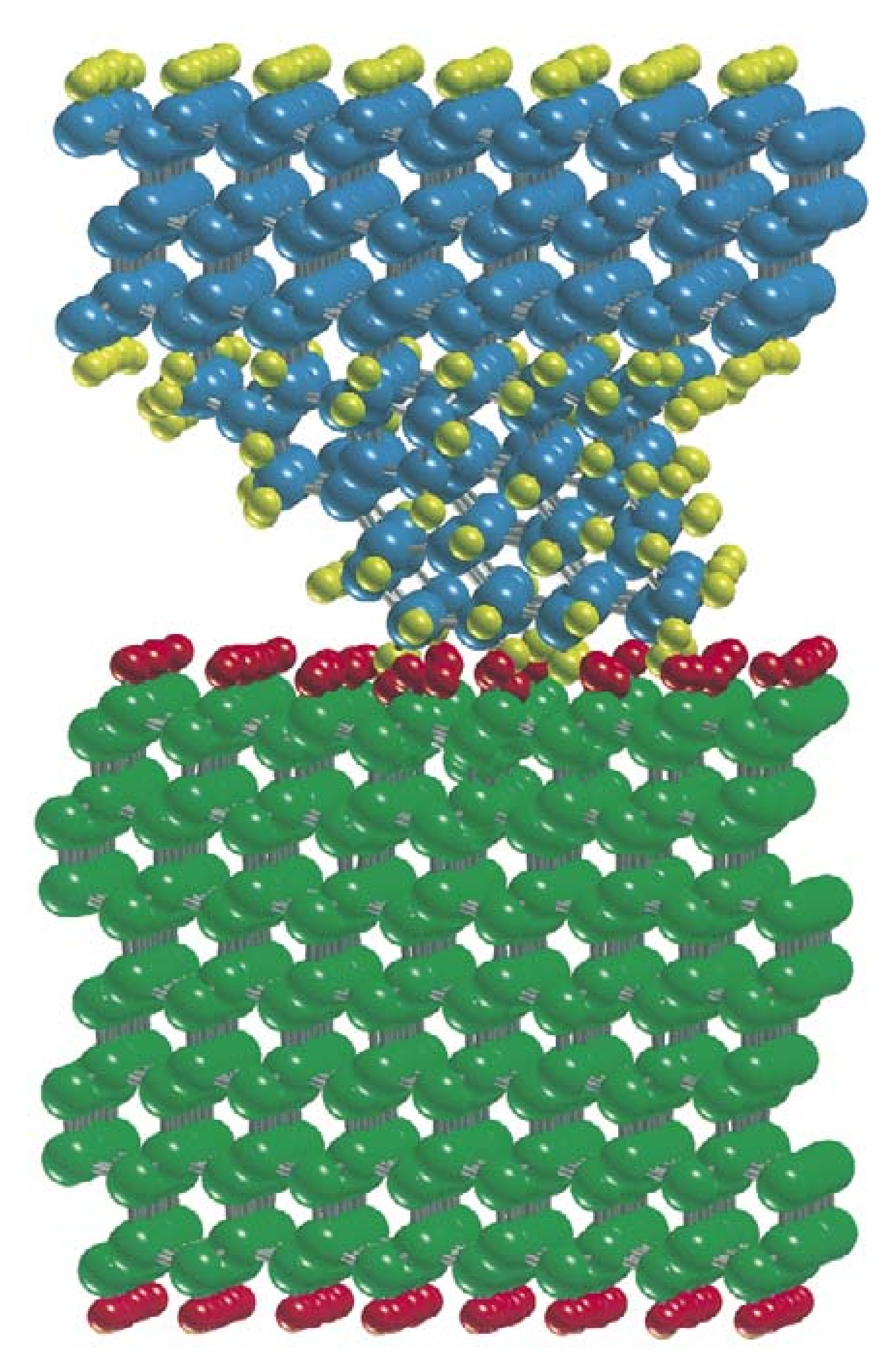
¿Cómo era posible que una capa líquida causase más fricción a escala atómica, si casi en cada situación de la vida diaria se las usa para lubricar dos superficies? Los estudios computacionales proporcionaron el eslabón crucial al abrir una rara ventana, cerrada de cualquier otra forma, al comportamiento molecular. Varios investigadores han desbrozado camino nanotribológico con el ordenador: entre ellos, Uzi Landman, del Instituto de Tecnología de Georgia, el primero en simular los contactos puntuales; Judith A. Harrison, de la Academia Naval de los Estados Unidos, que construyó modelos de los efectos químicos interfaciales, y James Belak, del Laboratorio Nacional Lawrence de Livermore, que analizó la mecanización y el desgaste.

El problema de la fricción líquida lo resolvieron Mark O. Robbins y sus colaboradores, de la Universidad Johns Hopkins, mediante la simulación del deslizamiento de películas de espesor monoatómico de criptón sobre superficies cristalinas de oro. Demostraron que los átomos de criptón líquido, al tener mayor movilidad que los del criptón sólido, se quedaban "pegados" con mayor facilidad en los intervalos entre átomos del oro sólido. Obsérvese que el movimiento tangencial tiene lugar entre una superficie sólida y una líquida, situación diferente de la que se da en la lubricación líquida macroscópica, donde ese movimiento ocurre dentro de la masa del líquido, es decir, en una interfaz líquido-líquido, que suele ofrecer menor resistencia a la cizalla que una interfaz sólido-líquido.

La casi perfecta concordancia entre el modelo de Robbins y nuestros resultados experimentales era, a la vez, sorprendente y significativa, porque en sus cálculos se atribuía toda la fricción a las vibraciones reticulares (las ondas sonoras). Su modelo despreciaba el rozamiento derivado de los efectos eléctricos, el que se da, cuando las superficies son aislantes, a causa de la atracción de las cargas positivas y negativas que se separan en la interfaz. (Se obtiene una atracción similar cuando se frota un globo con pelo y se deja que se pegue a una pared.) Pero cuando una o dos de las superficies en contacto son metálicas, no cabe pensar que la acumulación de carga sea importante. Más bien se dará otro tipo de fricción electrónica —según apuntó Mats Persson, de la Universidad Chalmers de Tecnología de Göteborg, y estudió a fondo el teórico Bo N. J. Persson, del Centro Jülich de Investigación. Esa fricción está relacionada con la resistencia que sufren los electrones móviles dentro del material metálico a medida que la superficie opuesta les arrastra.

Los físicos saben que esta forma de fricción existe, pero ignoran su alcance (es la razón de que pueda que haya sólidos pequeños que se deslicen con muy poco rozamiento, pero no que se libren de él por completo). Parecía que del éxito del modelo de Robbins y sus colaboradores se seguía que los efectos electrónicos no desempeñan un papel considerable en la fricción.

Para investigar esta cuestión con mayor detenimiento hemos medido la fuerza que se necesita para que unas películas sólidas de xenón con



6. UNA PUNTA cuasidiamantina, hecha de carbono (*azul*) e hidrógeno (*amarillo*), se desliza por la cara de un material parecido, una superficie de diamante hecha de carbono (*verde*) y terminada con átomos de hidrógeno (*rojo*). Estas simulaciones por ordenador son de utilidad en la triboquímica, o estudio de las reacciones inducidas por la fricción. En esta computación en concreto, la punta y la superficie se deforman, pero no se producen reacciones químicas.

un grosor de uno y dos átomos se deslicen por una superficie cristalina de plata. La fricción aumentaba alrededor de un 25 por ciento cuando se trataba de la película de espesor biatómico.

¿Se debía ese 25 por ciento a los efectos electrónicos? Probablemente no. Bo Persson, Robbins y Sokoloff han realizado, cada uno por su lado, simulaciones por ordenador del sistema xenón-plata. A tenor de sus primeros resultados, el rozamiento asociado a las ondas de sonido sería mucho mayor con dos capas que con una. La idea es que las dos capas crean un "instrumento musical" más elaborado; hay, por tanto, muchas más frecuencias resonantes excitables y, por ende, mayor rozamiento. La fricción electrónica, qué duda cabe, existe, pero puede que su magnitud esté determinada en gran medida sólo por los átomos inmediatamente adyacentes a la interfaz. Los parámetros seleccionados para representar las superficies metálicas en una simulación podrían enmascararla con facilidad. Ahora bien, conforme los trabajos teóricos y las simulaciones se depuren más y más, podremos calcular con exactitud qué proporción de la pérdida de energía está asociada a los efectos electrónicos y cuál a la vibración reticular.

Las nuevas reglas

En su avance, la nanotribología ha demostrado que las leyes de la fricción macroscópica no rigen a escala atómica. Podemos ahora reescribir las leyes del rozamiento de una manera más general. En primer lugar, la fuerza de fricción depende de la facilidad con la que se queden las dos superficies pegadas en comparación con su facilidad de despegarse: es proporcional al grado de irreversibilidad de la fuerza que aprieta una superficie contra la otra, no a su mera magnitud. En segundo lugar, la fuerza de fricción es proporcional al área de contacto real, no a la aparente. Por último, la fuerza de fricción es directamente proporcional a la velocidad de deslizamiento de la interfaz en los puntos de contacto reales, siempre y cuando no se deje que las superficies se calienten y mientras la velocidad de deslizamiento esté bastante por debajo de la velocidad del sonido. (Cerca de esta velocidad la fricción se estabiliza porque las vibraciones de la red no pueden hacer suya la energía sonora con suficiente rapidez.)

La discrepancia entre los fenómenos de la fricción macroscópica y microscópica se borra mucho si se cae en la cuenta de que es muy probable que el área real de contacto de los objetos macroscópicos sea proporcional a la fuerza que aprieta las superficies. Cuanto más se apriete, habrá más superficie de contacto. Por eso la presión parece ser proporcional a la carga normal, como dijo Amontons.

Y ¿qué ha sido de la rugosidad de la superficie? Parece que su importancia va quedándose en nada. Se suponía que las irregularidades de la superficie influían en la fricción de pegarse y resbalar, clase de rozamiento en el que las superficies que corren una sobre otra se enganchan momentáneamente y se sueltan. Ejemplos notorios son los chirriantes frenos de los trenes y las uñas que rascan una pizarra. Se creía que la rugosidad era la causa de la aleatoriedad de ese pegarse

y resbalar. Pero el grupo de Steve Granick, de la Universidad de Illinois, ha observado hace poco la fricción de pegarse y resbalar en los contactos lubricados entre dos superficies de mica nominalmente “perfectas”. Aplicaron millones de ciclos repetitivos de una fuerza sinusoidal a unos líquidos encerrados, sin desgaste, y los resultados que obtuvieron sugieren que la aleatoriedad (en concreto, el llamado ruido *1/f*) podría ser intrínseca a la fricción de pegarse y resbalar misma.

Si se tiene en cuenta la actual carrera por fabricar componentes de máquinas cuyas dimensiones sean mínimas, es posible que la investigación de la escala atómica, que hoy se considera de naturaleza sólo fundamental, mañana dé lugar a la aplicación directa. Sabemos por qué las sustancias cuyas cadenas moleculares están ramificadas son mejores lubricantes que las de moléculas de cadena lineal, aun cuando en volúmenes apreciables son más viscosas. (Siguen siendo líquidas sometidas a fuerzas mayores que las sustancias de moléculas de cadena lineal y, por tanto, son mejores a la hora de evitar que dos superficies sólidas entren en contacto.) Los nanotribólogos que trabajan con geometrías de contacto conocidas quizás ayuden un día a los químicos a entender las reacciones inducidas por el rozamiento que se producen sobre la superficie o a los científicos de materiales a diseñar sustancias resistentes al desgaste. Conforme vaya apremiando la necesidad de ahorrar energía y materias primas, la fiebre de los físicos por conocer los procesos básicos de la fricción subirá.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HISTORY OF TRIBOLOGY. D. Dowson. Longman, Londres, 1979.

FUNDAMENTALS OF FRICTION: MACROSCOPIC AND MICROSCOPIC PROCESSES. Dirigido por I. L. Singer y H. M. Pollock. Kluwer, 1992.

HANDBOOK OF MICRO/NANOTRIBOLOGY. Dirigido por B. Bhushan. CRC Press, 1995.

NANOTRIBOLOGY: FRICTION, WEAR AND LUBRICATION AT THE ATOMIC SCALE. B. Bhushan, J. N. Israelachvi y U. Landman en *Nature*, vol. 374, págs. 607-616; 13 de abril de 1995.

PHYSICS OF SLIDING FRICTION. Dirigido por B. N. J. Persson y E. Tosatti. Kluwer, 1996.

Charles Darwin y Alfred Wallace ante el espiritismo

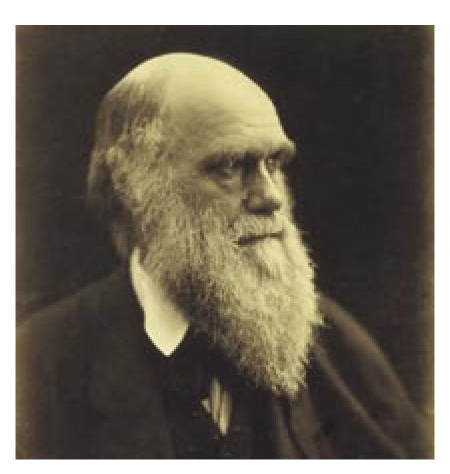
Cuando la ciencia oficial llevó a los tribunales a un espiritista, los codescubridores de la selección natural tomaron partidos opuestos

Richard Milner

El 16 de septiembre de 1876, después de comer, Charles Darwin, siguiendo una invariable rutina, se arrellanó en el sofá de su sala de estar, fumó un cigarrillo turco y se puso a leer el "siempre malintencionado *Times*". Con frecuencia, los artículos de política le hacían dar bufidos de cólera (el periódico apoyaba la causa segregacionista en la guerra civil de Norteamérica). Aquel día, en la sección de "Cartas", aparecía la noticia de que un joven zoólogo, Edwin Ray Lankester, estaba pleiteando contra un famoso médium espiritista, el "doctor" Henry Slade, acusándole de embaucar a los londinenses crédulos.

Llevando ante el tribunal a Slade como a "un vulgar pícaro", Lankester venía a ser el primer hombre de ciencia que acusaba de fraude a un médium profesional, y —pensaba Darwin— ¡ya era hora de que esto se hiciera! Pero, aunque encantado con que Lankester denunciara a Slade, le apenó a Darwin enterarse de que también era blanco de los ataques Alfred Russel Wallace, su amistoso rival y coautor de la teoría de la selección natural.

El proceso contra Slade se convertiría en uno de los más extraños casos judiciales de la Inglaterra victoriana. Hubo quienes lo vieron como un palenque en el que la ciencia podría lograr un triunfo aplastante sobre la superstición. Para otros fue la declaración de guerra entre los profesionales de lo "paranormal" y la cofradía de los ilusionistas honrados. Arthur Conan Doyle, celoso espiritista cuyo detective de ficción Sherlock Holmes era la lógica personificada, hablaba, recurriendo a un juego de palabras, de "persecución, que no proceso [*prosecution*], contra Slade". Pero lo que hizo único a aquel pleito fue que en él los dos máximos naturalistas del siglo tomaran partidos contrarios: el "archimaterialista" Darwin respaldó y alentó la celebración del proceso, mientras que Wallace, espiritista sincero, vino a ser el testigo estelar de la defensa —con lo que el litigio se convirtió en uno de los más curiosos y dramáticos episodios de la historia de la ciencia.



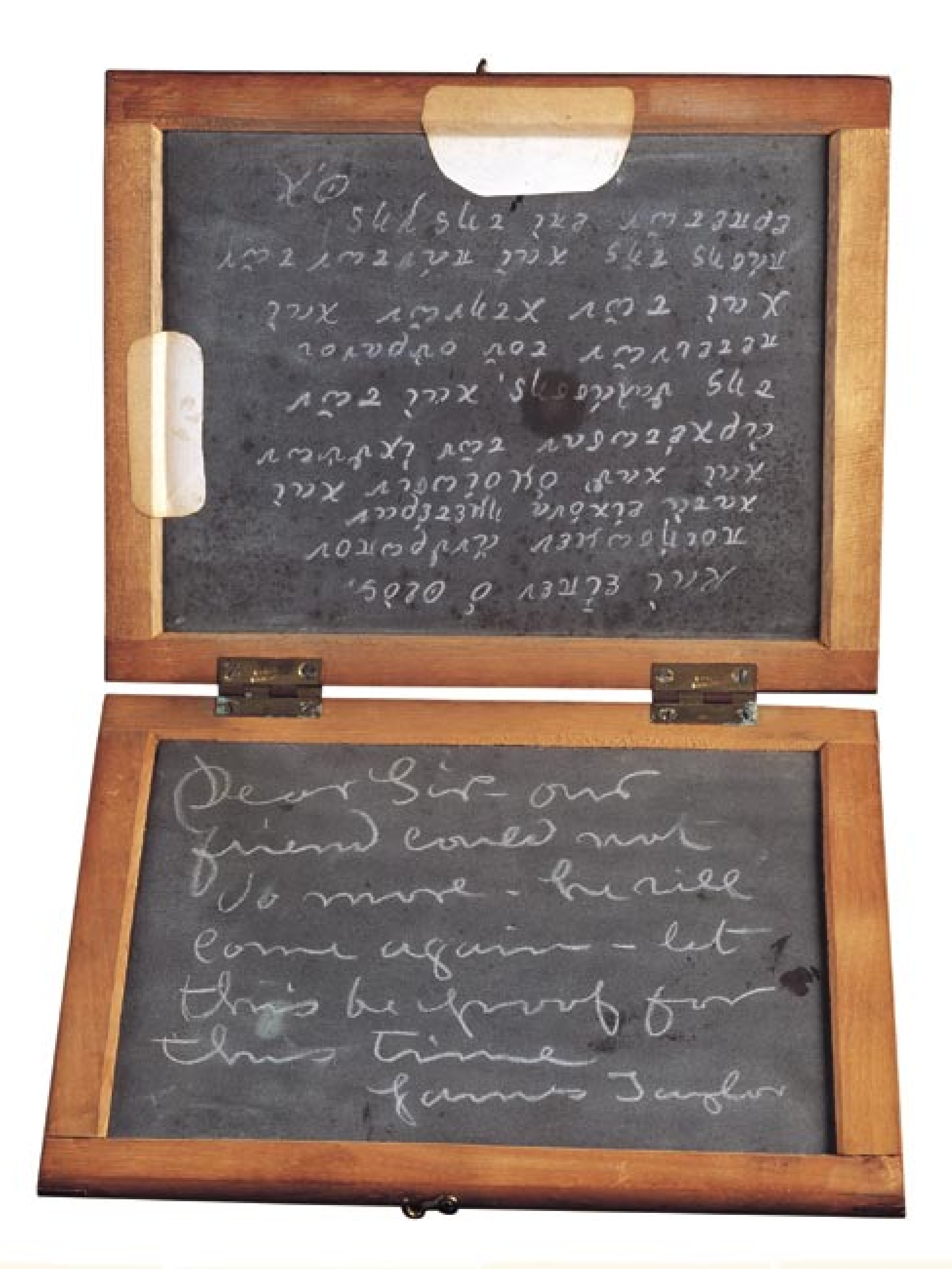
Charles Darwin, 1868

Wallace era respetado como escritor, zoólogo y botánico, descubridor de muchas especies nuevas, el primer europeo que estudió los primates en libertad y un adelantado de la zoogeografía. No obstante, siempre se buscó la ruina haciéndose el paladín de causas radicales: el socialismo, el pacifismo, la nacionalización del suelo, la conservación de la naturaleza, los derechos de la mujer y el espiritismo. Además de sus trabajos clásicos sobre biogeografía, selección natural, vida en las islas y el archipiélago Malayo, había escrito *Miracles and Modern Spiritualism* ("Los milagros y el espiritismo moderno"), en el que alababa a los médiums. Y acababa de permitir que en una de las sesiones de la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia se leyese un polémico artículo sobre "la transmisión del pensamiento" provocando un alboroto que le indujo a evitar durante el resto de su vida las reuniones científicas.

Wallace quería lo mejor de ambos mundos. Con los insectos o las aves era más riguroso que Darwin al aplicar el principio de la selección natural, pero cuestionaba su eficacia para los humanos. Si los primitivos homínidos sólo necesitaron la inteligencia de un gorila para sobrevivir, ¿por qué en ellos se desarrollaron cerebros capaces de inventar el lenguaje, componer sinfonías y hacer matemáticas? Si bien nuestro cuerpo había evolucionado por selección natural, respondía, el *Homo sapiens* tiene "algo que no proviene de sus progenitores animales, posee una esencia o naturaleza espiritual que sólo halla una explicación en el invisible universo del espíritu".

La afirmación de Wallace no se derivaba de ningún credo religioso, sino de su arraigado interés por el espiritismo: una fusión de antiguas creencias orientales con el deseo occidental de "secularizar" el alma

RICHARD MILNER ha dedicado 20 años al estudio de Charles Darwin, varios episodios de cuya vida, ignorados hasta ahora, ha descubierto. Licenciado en antropología por la Universidad de California en Los Angeles, y doctorado en Berkeley en 1968 con una tesis sobre la evolución humana, Milner es redactor de *Natural History*, órgano mensual del Museo de Historia Natural de Nueva York.



1
The writing within was ob-tained at a sitting with Dr Slade in the Autumn of 1876. We took two of his slates, ap-parently new, having the grey look of unused slates. I breathed upon them, rubbed them with my handkerchief, and putting the rubbed faces together, we tied them up fast with a piece of cord, with a fragment of pencil between them. Thus tied up the slates were laid

2
flat on the table without having been put underneath or removed for a moment from under my eyes. I placed both my hands upon them & Slade one of his. Presently we heard the writing begin. I bent down my ear to listen to it & we both remarked that it did not sound like writing, but like a succession of short strokes. My first im-pression was that they could not make the pencil mark. But it went on too long for that

3
At last the sound entirely changed giving me the impression of rapid writing in a running hand. When I came to open the slates I found that on one side was written the 26th verse of the 1st chap. of Genesis in Greek of the Septuagint version & on the other a short message in English. The Greek letters being each written separately were what had given the broken sound of the first part of the writing.

4
As the writing can be rubbed off with the slightest touch it plainly could not have existed in an invisible state upon the slate when well rubbed with my pocket handkerchief, to be subsequently brought out by the heat of my hand, as some have absurdly supposed. There is the same confusion between κ & χ that I have seen in most of the other slate-writing either by Slade or Eglinton

H Wedgwood

1. JUEGO DE PIZARRAS con escritura "espiritista". Se han conservado así desde una sesión de espiritismo celebrada en otoño de 1876, y, junto con ellas, una carta del primo y cuñado de Darwin, Hensleigh Wedgwood, atestiguando su autenticidad. El texto griego (*pizarra superior*) es un pasaje del Génesis en el que se describe la creación del hombre y de los animales, quizá traído a colación para molestar a los evolucionistas. El autor de este artículo encontró las pizarras el verano pasado en la biblioteca de la Universidad de Cambridge, donde habían estado ignoradas formando parte de una colección de cartas y fotografías donada por la Sociedad Archivadora de la Investigación Psíquica.



2. ESCENIFICACION del Tribunal de Justicia, según el grabado de un periódico, durante un proceso que despertó el interés de la Inglaterra victoriana. En él, Edwin Ray Lankester (*de pie*) testificó contra el "psíquico" Henry Slade (*el primero a la izquierda*). Lankester está mostrando una pizarra utilizada por Slade en sus sesiones de espiritismo.

y demostrar su existencia. Cuando, en 1869, hizo pública esta opinión, Darwin le escribió: "Lamento estar en desacuerdo con usted; yo no veo ninguna necesidad de apelar a una causa adicional y próxima para el caso del Hombre... Confío en que no haya asestado un golpe mortal a nuestra común criatura" —esto es, a la teoría, concebida por ambos, de la selección natural.

Como Wallace (y sus descendientes intelectuales, los teóricos de la "Nueva Era"), muchos victorianos rechazaban el materialismo axiomático; buscaban un "telégrafo sin hilos" para comunicarse con un mundo intangible. Aunque Darwin y la mayoría de los científicos excluían de sus lucubraciones los milagros, algunos compartían las opiniones de Wallace. Estaban entre éstos el físico Oliver Lodge y el químico William Crookes, descubridor del talio.

El espiritismo atraía a personas de intereses variopintos, pero su mayor mordiente residía en una supuesta posibilidad de comunicarse con los difuntos. Esta fase del movimiento comenzó en 1848, con las hermanas Margaret y Kate Fox, de Hydesville. Cuando estas dos adolescentes neoyorquinas conversaban con los "espíritus", unos misteriosos golpes secos transmitían largos mensajes. (Treinta años después, una de las hermanas, célebre y rica, admitió que aquellos ruidos los había producido ella chascando la articulación del dedo gordo de uno de sus pies, que resonaba en el interior del zapato.) Durante los 80 años siguientes, el espiritismo gozó de enorme popularidad en los EE.UU. y en Europa.

Hensleigh Wedgwood, primo y cuñado de Darwin, se convirtió al credo espiritista a comienzos de los años setenta. Wedgwood ansiaba llegar a ser un sabio tan respetado como Darwin, Francis Galton (primo de ambos) y Erasmo Darwin, abuelo de Charles. Pero un par de embaucadores, Charles Williams y Frank Herne, se dieron cuenta de su carácter crédulo. A instancias de ellos, Wedgwood pidió a Darwin que fuese a las sesiones de Williams a ver acordeones que tocaban por sí solos, mesas levitantes, escrituras automáticas y refulgentes manos de espíritus. Darwin se las arregló siempre para no asistir, poniendo por excusa el exceso de fatiga o de ocupación o su mala salud.

Sin embargo, en enero de 1874, Darwin hizo que dos íntimos suyos asistieran a una de las sesiones de Williams: Thomas H. Huxley y su propio hijo George Darwin, que entonces contaba 29 años. Huxley fue presentado como "el señor Henry" (su segundo nombre). Aunque vieron que por sí solas giraban unas botellas y una guitarra tocaba, ambos sacaron la conclusión de que todo aquello no eran más que trucos y supercherías. George, astrónomo en ciernes, escribió que le había chocado el encontrar "tan poco válida" la explicación que de las sesiones de Williams daba su tío Hensleigh. Aquel mismo año, Darwin escribió a un periodista urgiéndole a que desenmascarase a Williams como "a un sinvergüenza que durante tantos años ha estado engañando al público".

Al año siguiente, Edwin Ray Lankester, joven ayudante de laboratorio de Huxley, decidió sorprender a Williams y a Herne en fraude. Pero, después de la visita de Huxley y George, el médium se tornó cauteloso y evitó a cuantos pudieran tener conexiones con el círculo de Darwin. Luego, en abril de 1876, se le puso a tiro a Lankester una nueva y tenta-

dora pieza: el "doctor" Henry Slade, afamado "psíquico" estadounidense que había ido a Londres "para probar la verdad de la comunicación con los difuntos". Slade aseguraba que el espíritu de su esposa le escribía mensajes en unas pizarras.

Lankester y Horatio Donkin, condiscípulo suyo en la facultad de medicina, fueron a ver a Slade simulando ser creyentes. Pagaron la entrada, hicieron preguntas a los espíritus y recibieron respuestas misteriosamente escritas. Pero, de improviso, en la oscuridad de la habitación, Lankester le quita a Slade de las manos una pizarra, y, hallando escrita allí la respuesta a una pregunta que él aún no había formulado, le llama a gritos "canalla e impostor".

Al día siguiente, Slade y su cómplice Geoffrey Simmonds estaban en poder de la policía acusados de violar la Ley de Vagos y Maleantes, norma de larga historia contra quiromantes y fulleros. A lo largo del otoño de 1876, el juicio contra Slade fue la comidilla de Londres. La sala del tribunal estaba abarrotada con los partidarios y los detractores de Slade, más 30 periodistas que la comunicaban con la calle. Día tras día el *Times* publicaba transcripciones del juicio.

Darwin, cuya hija Annie había muerto en 1851 a los 10 años de edad, sólo sentía desprecio para con los "hábiles granujas" que tratan de aprovecharse del dolor de los parientes. Sin embargo, evitaba manifestarlo en público; con su obra *Sobre el origen de las especies* había provocado controversias suficientes para toda su vida. En privado, escribió a Lankester una efusiva carta de congratulación. Meter en la cárcel a Slade sería un beneficio público —decía—, e insistía en contribuir con 10 libras esterlinas a las costas judiciales. (La ley inglesa manda al demandante pagar los gastos del juicio; 10 libras era bastante dinero, aproximadamente el sueldo mensual de un trabajador.)

Avanzada ya la vista, anunció el querellante que el ilusionista John Nevil Maskelyne estaba dispuesto a reproducir todos los "pretendidos fenómenos" que se observaron en la sesión. El juez, por su parte, advirtió que el practicar en la sala del tribunal unos trucos de magia con pizarras no probaría nada; la cuestión era si Lankester y Donkin habían o no sorprendido a los acusados en el fraude de sostener que quien allí escribía era un espíritu.

Los dos hombres de ciencia resultaron ser malísimos testigos; su gran capacidad de observación, desarrollada en los laboratorios de anatomía y de fisiología, fue inútil a la hora de detectar el engaño de unos profesionales de la astucia. Según anotó luego Huxley, "en estas investigaciones son mucho más útiles las cualidades del detective que las del científico... Puede que un hombre sea excelente como naturalista o químico, y, sin embargo, no valga como detective".

Al parecer, Lankester y Donkin no lograron ponerse de acuerdo en mucho más que en su acusación de que Slade era un impostor. ¿Se había servido el médium, para escribir, de algo semejante a un dedal, o había sostenido por debajo alguna suerte de pizarrín mientras su dedo pulgar era visible sobre la superficie de la mesa? ¿Cambió la pizarra limpia por otra que llevara escrita? ¿Era una mesa normal o tenía barras deslizantes y paneles trucados? Los dos acusadores no pudieron aclarar ni cuándo ni cómo se había realizado la escritura.

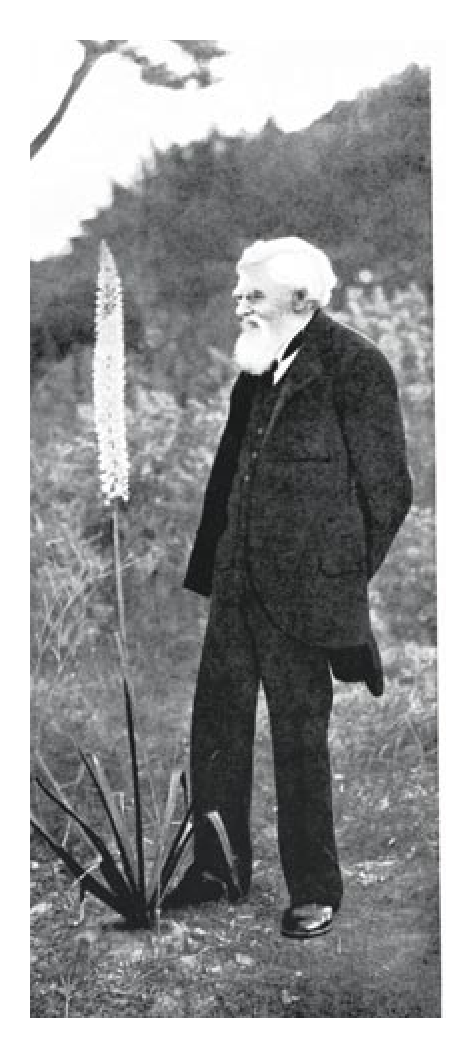
En cambio, la exhibición de magia efectuada por Maskelyne ante el tribunal fue perfecta. En respuesta a una pregunta sobre la escritura instantánea, fue restregando con una esponja húmeda una pizarra limpia hasta que en ella apareció escrito: "¡Los espíritus están aquí!" A continuación, borró la pizarra y volvió a pasar por ella la esponja. El mensaje reapareció, y Simmonds, el socio de Slade, exclamó fascinado: "¡Maravilloso! ¿Podría examinar yo la pizarra?" Maskelyne le espetó con sorna: "¡Pero si usted conoce ya el intríngulis!"

A instancias de la acusación, Maskelyne realizó varios trucos más con la pizarra, hasta que el juez desestimó la validez probatoria de tales manejos. Entonces la acusación ofreció a Slade dos pizarras unidas con bisagras y broche. ¿Por qué no hacía que apareciese un escrito en la cara interna de aquellas pizarras cerradas, y así convencería al mundo? Slade replicó que hasta tal punto le habían fastidiado tan molestas pruebas que Allie, el espíritu de su mujer, había decidido no escribir jamás en una pizarra cerrada.

Cierto químico de nombre Alexander Duffield, testigo de la parte acusadora, declaró que Slade le había convencido "de que se podía establecer una especie de oficina de correos para comunicarse con 'el otro lado'", pero que ahora tenía sus dudas. Otro informó de que pocos años antes, en los EE.UU., alguien le había arrebatado también a Slade una pizarra en mitad de una sesión, incriminándolo de fraude.



3. ENTRE LOS CREYENTES en el espiritismo se contaron Wedgwood (*arriba*) y Alfred Russel Wallace (*abajo, fotografiado en su jardín ante una lanza regia en 1905*). La reputación científica de Wallace sufrió detrimento por su defensa de Slade; el episodio distanció para siempre a Darwin y Wedgwood.



El punto álgido del proceso fue la aparición de Wallace en la defensa. Su integridad y candor eran de dominio público. Cuando subió a declarar, dijo que él había presenciado los fenómenos en cuestión pero se negaba a especular sobre si los escritos serían o no obra de espíritus. Consideraba que Slade era un caballero honrado “tan incapaz de cometer una impostura... como cualquier serio buscador de la verdad que investigase en el departamento de Ciencias Naturales”.

El abogado de Slade arguyó, en su recapitulación, que no había ninguna prueba real contra su cliente. Nadie había probado que la mesa estuviese entrampillada, y las demostraciones de Maskelyne acerca de cómo *podrían* haberse realizado unos trucos no venían al caso. Que aquel escrito apareciera antes de haberse formulado la correspondiente pregunta no probaba nada respecto a su origen. Y Lankester y Donkin no conseguían ponerse de acuerdo sobre qué era exactamente lo que habían visto durante la sesión. Además, un científico de la talla eminente de Wallace merecía por lo menos tanto crédito como el joven Lankester. El letrado terminó su peroración evocando a Galileo y recalcando que los científicos innovadores que osan desafiar las creencias de su época son siempre vilipendiados. Ironía que no podía caer en saco roto entre los evolucionistas.



4. LANKESTER llegaría a ser con el tiempo director del Museo Británico de Historia Natural y figura bien conocida en el desarrollo de la zoología. Esta caricatura de 1905 en *Vanity Fair* le representa mirando complacidamente a un bucerótido, ante la observación de un xifosuro. La monografía de Lankester sobre los artrópodos se considera todavía un estudio clásico. Pero, en 1912, también Lankester fue engañado por un fraude proevolucionista, el del “hombre de Piltdown”.

Pero nada pudo salvar a Slade. El juez dijo que comprendía que el espiritismo era “una especie de religión nueva” y que, por su parte, en modo alguno quería ofender a los creyentes sinceros. Sin embargo, la cuestión planteada ante el tribunal era si Slade y Simmonds habían hecho pasar fraudulentamente sus propias acciones como fenómenos paranormales; y, dado que él debía decidir “según el curso ordinario y bien conocido de la naturaleza”, sentenciaba condenando al acusado a tres meses de trabajos forzosos en una penitenciaría.

Slade nunca cumplió tal sentencia. Recurrida que fue, otro juez dictaminó que la Ley de Vagos y Maleantes no podía aplicarse contra la escritura de los espíritus. Slade y su compinche huyeron a Alemania. Al cabo de poco, Slade había convencido a su patrón, un prestidigitador local, al jefe de policía y a varios científicos alemanes (entre otros al físico Johann Zöllner, de la Universidad de Leipzig) de que él estaba en contacto con los espíritus y con diversas fuerzas paranormales. Cuando su crédito iba en mengua, se largaba de nuevo. Andando el tiempo, acabó alcoholizado en una miserable fonducha neoyorquina y fácil presa para los editores de periódicos sensacionalistas.

La controversia perjudicó no sólo a Slade, sino también a otros relacionados con el caso. En 1879 Darwin trató de conseguir apoyo para que se le concediera a Wallace una pensión oficial en reconocimiento de sus contribuciones a las ciencias de la naturaleza. Sabía que Wallace se ganaba a duras penas la vida calificando exámenes escritos. Pero cuando Darwin escribió a Joseph Hooker, director de los Reales Jardines de Kew, éste se negó a ayudarle. “Wallace ha perdido categoría hasta un extremo increíble”, replicó con crudeza, “no sólo por su adhesión al espiritismo, sino porque deliberadamente y contra el parecer unánime del comité” ha permitido que el artículo sobre telepatía mental se lea en las reuniones científicas. Además, Hooker pensaba que el gobierno “¡debería, en puridad, ser informado de que el candidato es un público y destacado espiritista!”.

Darwin contestó impávido que las creencias de Wallace “no eran peores que las supersticiones imperantes en el país”. Darwin y Huxley tocaron algunos resortes más, y Darwin acabó escribiendo personalmente al primer ministro William Gladstone, quien a su vez hizo llegar la petición a la reina Victoria. Por fin, Wallace disfrutó de una modesta pensión y, gracias a ella, pudo seguir escribiendo sus artículos y libros hasta que murió nonagenario en 1913.

En los años que siguieron al del juicio, Wedgwood y Darwin no supieron mucho el uno del otro. En 1878, un reportero del periódico *Light* había logrado desenmascarar a Charles Williams, el médium que intentara servirse de Wedgwood para congraciarse con la familia Darwin. Cuando el periodista, en una de las sesiones de espiritismo, encendió de repente la luz, se le encontró a Williams disfrazado con una postiza barba negra y cubierto con andrajos fosforescentes, o, como Darwin diría después, “en atuendo de sucio fantasma”.

“¡*Espléndido* descubrimiento!”, exclamó Darwin con entusiasmo al leer la noticia. Pero aun entonces la fe de su cuñado permaneció inamovible: unas pocas actuaciones fallidas solamente indicaban que al médium

le era difícil pasar "al otro lado" y que obraba presionado por el afán de no decepcionar a su clientela. Para Darwin, esto era el colmo: "¡Hensleigh Wedgwood admite que se ha demostrado que Williams es un granuja", bramaba, "y sin embargo insiste en asegurar que él ha visto auténticos espíritus [en las sesiones de Williams]! ¿No estamos ante una rareza psicológica?"

En 1880 Wedgwood envió a Darwin un largo manuscrito de su propio puño y letra en el que exponía una mezcolanza espiritista de religión y ciencia. ¿Querría Darwin leerlo y tal vez sugerir dónde podrían publicarlo? En un momento de melancolía, Darwin se puso a contestar a su primo. Acaso recordara la época en que, muchos años atrás, Wegdwood le había prestado su apoyo ayudándole a convencer a su tío el padre de Darwin para que le permitiese a éste enrolarse en el *Beagle*. A su primo fue a quien Darwin confió otrora la publicación de su teoría de la selección natural.

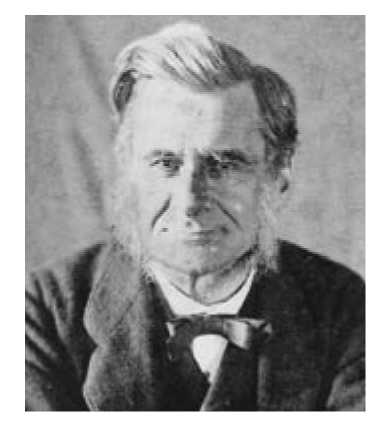
"Mi querido primo", escribió Darwin, "hace tanto tiempo que no nos vemos, que quizá si ahora nos encontrásemos no nos conoceríamos; pero tu imagen de aquel entonces la recuerdo perfectamente". Se negaba incluso a leer el trabajo de Hensleigh, diciéndole que "ha habido ya demasiados intentos semejantes de conciliar el Génesis con la ciencia". Los dos primos, tan próximos antaño, estaban ahora totalmente distanciados en la cuestión de la ciencia y lo paranormal.

Ese mismo año, Lankester, a la sazón profesor de zoología, rechazó demandas de proseguir la lucha contra el espiritismo. En carta enviada en 1880 a la *Pall Mall Gazette* escribió: "El médium es un curioso espécimen de la historia natural escurridizo y maligno; si deseas estudiarlo, lo has de coger desprevenido... Yo ya cumplí con mi parte en la caza de canallas; continúenla otros." Años después fue nombrado director del Museo Británico de Historia Natural.

Por ironía del destino, Lankester, el debelador de los impostores, fue en 1912 engañado como un chino en el asunto del "hombre de Piltdown", uno de los más famosos fraudes de la historia de la biología evolucionista. Durante los 40 años siguientes, muchos científicos dieron por cierto que los fragmentos del "simio-hombre", excavados a unos 40 kilómetros del hogar de Darwin, eran restos del "eslabón perdido". Entusiasmados con la teoría de Darwin y Wallace, tanto Lankester como los evolucionistas de la siguiente generación tuvieron por auténtico aquel falso fósil.

Huxley, que murió en 1895, sabía muy bien que no pocos hombres de ciencia propenden a desarrollar las creencias que irracionalmente abrigan. De joven, había combatido contra la jerarquía anglicana para imponer el enfoque científico en la intrincada cuestión del origen del hombre, pero ya entrado en años le dijo con sarcasmo a un educador que "nosotros o nuestros hijos viviremos para ver cómo se pone toda la estupidez *a favor* de la ciencia"... atinada profecía de lo que iban ser Piltdown... y el considerar un sucedáneo de la "Edad de Piedra" a la tribu yasaday de las Filipinas... y el cuento de la fusión fría. En *El origen del hombre*, el propio Darwin recomendaba mostrarse escépticos respecto a los datos no confirmados; estaba convencido de que aceptar pruebas débiles era mucho más peligroso que adoptar teorías incorrectas. "Los datos falsos son muy perjudiciales para el progreso de la ciencia, pues a menudo perduran mucho tiempo", escribió. "En cambio, las opiniones erróneas, aunque las respalde alguna prueba, hacen poco daño, pudiendo cualquiera experimentar un sano placer en refutarlas."

Huxley, médium



Thomas H. Huxley, en la década de los sesenta

A diferencia de Charles Darwin, el zoólogo Thomas H. Huxley tuvo para con las pretensiones espiritistas desdén o ráfagas de buen humor. Cierta vez asistió a una sesión en la que una atractiva dama norteamericana estaba embaucando con suma habilidad a una selecta concurrencia mediante el fraudulento despliegue de pretendidos poderes psíquicos para leer el pensamiento. Aunque Huxley se percató de la superchería, declaró luego que la dama le había encantado hasta tal punto que, galantemente, no había querido ponerla en evidencia. "El fraude es a menudo genialidad fuera de lugar", dijo con socarronería, "y reconozco que nunca he podido superar cierta admiración secreta a la señorita X".

Cuando Alfred Russel Wallace le envió un ejemplar de su libro sobre el espiritismo, Huxley le contestó: "Puede que todo eso sea cierto... pero la verdad es que yo no consigo interesarme lo más mínimo en el tema." Sin embargo, Huxley se interesó lo bastante como para dominar la técnica de producir sonoros chasquidos con los dedos gordos de los pies dentro de sus botas, de modo que también podía él fingir mensajes de los espíritus. "A fuerza de paciencia, perseverancia y práctica", explicaba, los chasquidos de la articulación del dedo "se pueden repetir rápidamente, y de manera que suenen *forte* o *piano* a voluntad. Para lograr el mejor efecto, es aconsejable ponerse unos calcetines finos y unas botas holgadas y de suelas duras; además, conviene elegir un sitio donde la alfombra sea menos tupida, de modo que se aproveche la resonancia del suelo". *—R. M.*

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ALFRED RUSSEL WALLACE, THE ORIGIN OF MAN, AND SPIRITUALISM. Malcolm Jay Kottler en *Isis*, volumen 65, n.º 227, páginas 145-192; junio, 1974.

THE WEDGWOOD CIRCLE, 1730-1897: FOUR GENERATIONS OF A FAMILY AND THEIR FRIENDS. Barbara y Hensleigh Wedgwood. Collier-Macmillan (Canadá), 1980.

"I WILL GLADLY DO MAY BEST": HOW CHARLES DARWIN OBTAINED A CIVIL LIST PENSION FOR ALFRED RUSSEL WALLACE. Ralph Colp, Jr., en *Isis*, vol. 83, n.º 1, págs. 3-26; marzo, 1992.

THE ENCYCLOPEDIA OF EVOLUTION: HUMANITY'S SEARCH FOR ITS ORIGINS. Edición revisada. Richard Milner. Henry Holt and Company, 1993.

¿Existen límites lógicos para el conocer?

Los modelos matemáticos utilizados en muchos campos de la ciencia se ven incapaces de dar respuesta a ciertas cuestiones del mundo real. Pero quizás haya formas de eludir estos problemas

John L. Casti

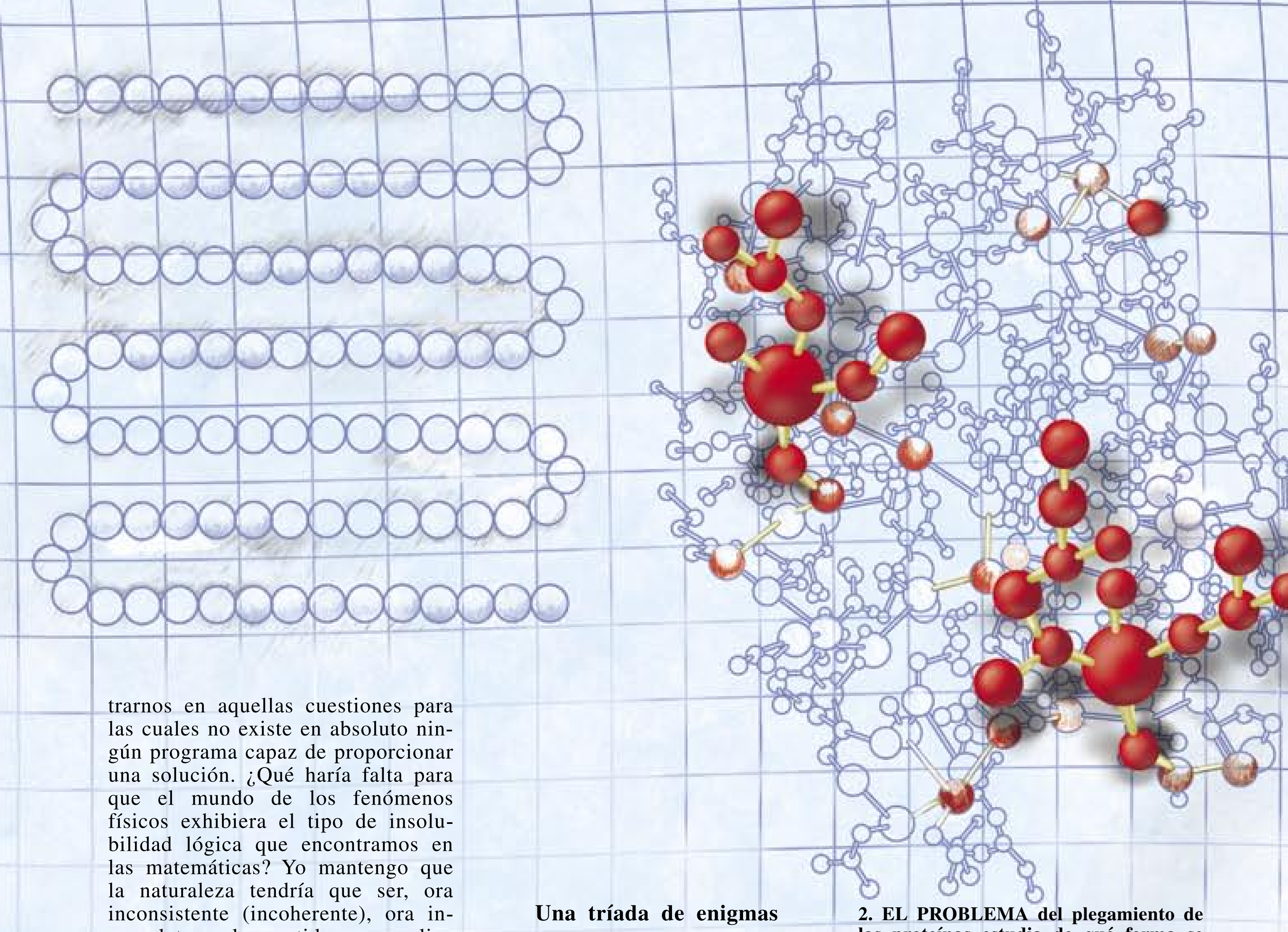
A quien se haya contagiado con la idea de que la capacidad de la mente humana es ilimitada en su facultad para resolver cuestiones, un paseo por la matemática del siglo XX habrá de resultarle desazonante. En 1931, Kurt Gödel establecía su teorema de incompletitud; en razón del mismo, ningún sistema de inferencia deductiva permite dar respuesta a todas las preguntas concernientes a los números naturales. Pocos años después, Alan M. Turing demostraba una proposición equivalente para los programas de ordenador; se afirma en ella la inexistencia de un procedimiento sistemático capaz de determinar si un cierto programa acabará por detenerse cuando procesa un conjunto de datos. Más recientemente, Gregory J. Chaitin, de IBM, ha descubierto proposiciones aritméticas cuya veracidad nunca puede quedar establecida por un sistema de reglas deductivas, cualquiera que éste sea.

Se trata de hallazgos que imponen límites a nuestra capacidad cognoscitiva en el mundo de la matemática y la lógica. ¿Existen restricciones similares para nuestra capacidad de hallar respuesta a los problemas que suscita la naturaleza o los asuntos humanos? Al afrontar esta cuestión, la tarea primera, y seguramente la más enojosa, consiste en determinar qué ha de entenderse por "conocimiento científico". Para tajar este nudo gordiano filosófico, séame lícito adoptar la postura, quizá moderadamente controvertida, de que una de las formas científicas de dar respuesta a una cuestión adopta la forma de un sistema de reglas o, si se quiere, de un programa. Lo que se hace es, sencillamente, introducir la cuestión en el sistema de reglas, accionar después la manivela de la deducción lógica y esperar, por fin, a que aparezca la respuesta.

La idea según la cual el conocimiento científico viene generado por lo que en definitiva es un programa informático suscita el problema de los límites o capacidad de la computación. Está muy extendida la opinión de que la dificultad del famoso problema del viajante, consistente en hallar el itinerario más corto que conecta un gran número de ciudades, crece exponencialmente al aumentar el número de puntos de destino. Por ejemplo, la determinación del itinerario óptimo para un viajante que hubiera de visitar 100 ciudades exigiría el examen de 100 × 99 × 98 × 97 ×...× 1 posibilidades, tarea en la que hasta el más veloz de los ordenadores tendría que invertir miles de millones de años.

Pero tal cómputo, al menos en principio, es posible. Vamos a cen-

1. EL VIAJANTE DE COMERCIO necesitaría utilizar el ordenador más rápido del mundo durante miles de millones de años para calcular el itinerario más corto que pasa por 100 puntos de destino. Los científicos están buscando métodos para hacer más manejables tales problemas.



trarnos en aquellas cuestiones para las cuales no existe en absoluto ningún programa capaz de proporcionar una solución. ¿Qué haría falta para que el mundo de los fenómenos físicos exhibiera el tipo de insolubilidad lógica que encontramos en las matemáticas? Yo mantengo que la naturaleza tendría que ser, ora inconsistente (incoherente), ora incompleta, en los sentidos que explico a continuación. La consistencia (coherencia) significa que en la naturaleza no existen auténticas paradojas. En general, cuando encontramos lo que parece ser una de ellas —como los chorros de gas aparentemente emitidos a velocidades mayores que la de la luz por ciertos cuásares— las investigaciones posteriores han proporcionado una explicación. (Los chorros "superlumínicos" resultaron ser ilusiones ópticas provocadas por efectos relativistas.)

La completitud de la naturaleza entraña la imposibilidad de que surja un estado físico sin razón alguna; en breve, que existe una causa para cada efecto. Puede que algunos analistas opongan que la teoría cuántica contradice el aserto de que la naturaleza es consistente y completa. En realidad, la ecuación que rige la función de onda de un fenómeno cuántico proporciona una explicación causal para cada observación (completitud) y está bien definida en cada instante temporal (consistencia). Las notables "paradojas" de la mecánica cuántica nacen de nuestro empeño en concebir el objeto cuántico como si fuera un objeto clásico.

Una tríada de enigmas

Estoy convencido de que la naturaleza es, a un tiempo, consistente y completa. Por otra parte, la dependencia de la ciencia respecto de la matemática y la argumentación deductiva constituye un obstáculo para nuestra capacidad de dar respuesta a ciertas cuestiones relativas al mundo natural. Para resaltar más nítidamente este punto, echemos un vistazo a tres renombrados problemas tomados de los campos de la física, la biología y la economía.

• Estabilidad del sistema solar. El problema más célebre de la mecánica clásica es el problema de N cuerpos. A grandes rasgos, se plantea cuál es el comportamiento de un sistema compuesto por N masas puntuales que se mueven de acuerdo con la ley de atracción gravitatoria de Newton. Una de las versiones del problema indaga si dos o más de estos cuerpos llegarán a entrar en colisión o si alguno de ellos terminará por adquirir una velocidad arbitrariamente grande en un tiempo finito. En su tesis doctoral, Zhihong (Jeff) Xia, de la Universidad del Noroeste, demostró que, en ciertas hipótesis, un único cuerpo que se moviera en vaivén entre dos sistemas binarios (cinco masas en total) podría adquirir una velocidad arbitrariamente elevada y verse expulsado del sistema. Tal resultado, que básase en una configuración geométrica especial de las posiciones de los cuerpos, nada nos dice acerca del caso concreto de nuestro sistema solar. Pero sí hace nacer la duda de que quizás el sistema solar pudiera no ser estable. Y lo que reviste todavía mayor interés, el hallazgo ofrece nuevos instrumentos con los que investigar la materia.

• El plegamiento de las proteínas. Las proteínas que forman parte de los seres vivos están constituidas por secuencias de muchísimos aminoácidos, enlazados a la manera de cuentas en un collar. Una vez que tales cuentas se hallan dispuestas en la sucesión correcta, la proteína se repliega rá-

2. EL PROBLEMA del plegamiento de las proteínas estudia de qué forma se repliega casi instantáneamente una cadena de aminoácidos (*izquierda*) para formar una proteína tridimensional de complejidad extraordinaria (*derecha*). Los biólogos están esforzándose en desvelar las "reglas" bioquímicas a las que las proteínas obedecen para conseguir tal hazaña.

pidamente, adoptando una estructura tridimensional específica en grado sumo, determinante de su función en el organismo. Se ha estimado que un superordenador que aplicase reglas plausibles para el plegamiento proteínico tardaría unos 10^{127} años en dar con la forma plegada final incluso en el caso de una secuencia muy corta, compuesta nada más por unos 100 aminoácidos. De hecho, en 1993, Aviezri S. Fraenkel, de la Universidad de Pennsylvania, demostró que la formulación matemática del problema de replegado proteínico es computacionalmente "difícil" en el mismo sentido que lo es el problema del viajante. ¿Cómo lo resuelve la naturaleza?

• Eficacia bursátil. Uno de los pilares en que descansa la teoría académica clásica de la ciencia de las finanzas consiste en la eficiencia de los mercados bursátiles. Es decir, el mercado procesa en el acto toda la información concerniente a unos valores o mercancías y la incorpora al precio actual de esos títulos o efectos. En consecuencia, esos precios, una vez descontado el efecto de la inflación, deberían variar de manera impredictible y esencialmente aleatoria. A su vez, ello significa que los planes comerciales basados en cualquier tipo de informaciones que tengan carácter público, como el historial de las cotizaciones, de nada podrían servir; no puede existir un plan que durante un intervalo de tiempo significativo obtenga mejores resultados que el mercado en su conjunto. Pero los mercados financieros reales no parecen prestar gran atención a la teoría académica. La bibliografía financiera está llena de "anomalías" del mercado, tales como el efecto "ratio precios bajos-ganancias", que afirma que las acciones de empresas cuyos precios son bajos con relación a sus ganancias se revalorizan antes que el índice del mercado.

JOHN L. CASTI es profesor en la Universidad Técnica de Viena y en el Instituto Santa Fe. El autor da las gracias a Joseph F. Traub, Piet Hut, James B. Hartle y Åke E. Andersson por sus estimulantes conversaciones acerca de estos temas y al Instituto de Estudios Futuros de Estocolmo por el respaldo prestado a su investigación.

El carácter extrarreal de la matemática

El examen de las tres cuestiones recién planteadas ha producido lo que parecen ser tres respuestas. Primera: puede que el sistema solar no sea estable. Segunda: el plegamiento de las proteínas es computacionalmente difícil. Y tercera: es probable que los mercados bursátiles no sean totalmente eficientes. Pero lo que todas estas presuntas "respuestas" comparten con las demás es que en cada una interviene una *representación* matemática del problema planteado en el mundo real, y no el problema propiamente dicho. Por ejemplo, la solución dada por Xia al problema de los N cuerpos no explica de qué forma se mueven los cuerpos planetarios reales solicitados por las fuerzas gravitatorias del mundo real. De igual manera, la conclusión de Fraenkel de que el plegamiento de las proteínas constituye un problema computacionalmente difícil no entra en la cuestión de cómo se las arreglan las proteínas para llevar a cabo su trabajo en segundos, y no miles de millones de años. Y, como es patente, los sagaces operadores de Wall Street llevan decenios saltándose a la torera la hipótesis de la eficiencia del mercado. Por tanto, para deducir conclusiones sobre la incapacidad de la ciencia para habérselas con tales cuestiones tenemos que justificar, o bien que el modelo matemático constituye una representación fiel de la situación física, o bien abandonar las matemáticas por completo. Examinaremos ambas opciones en lo que sigue.

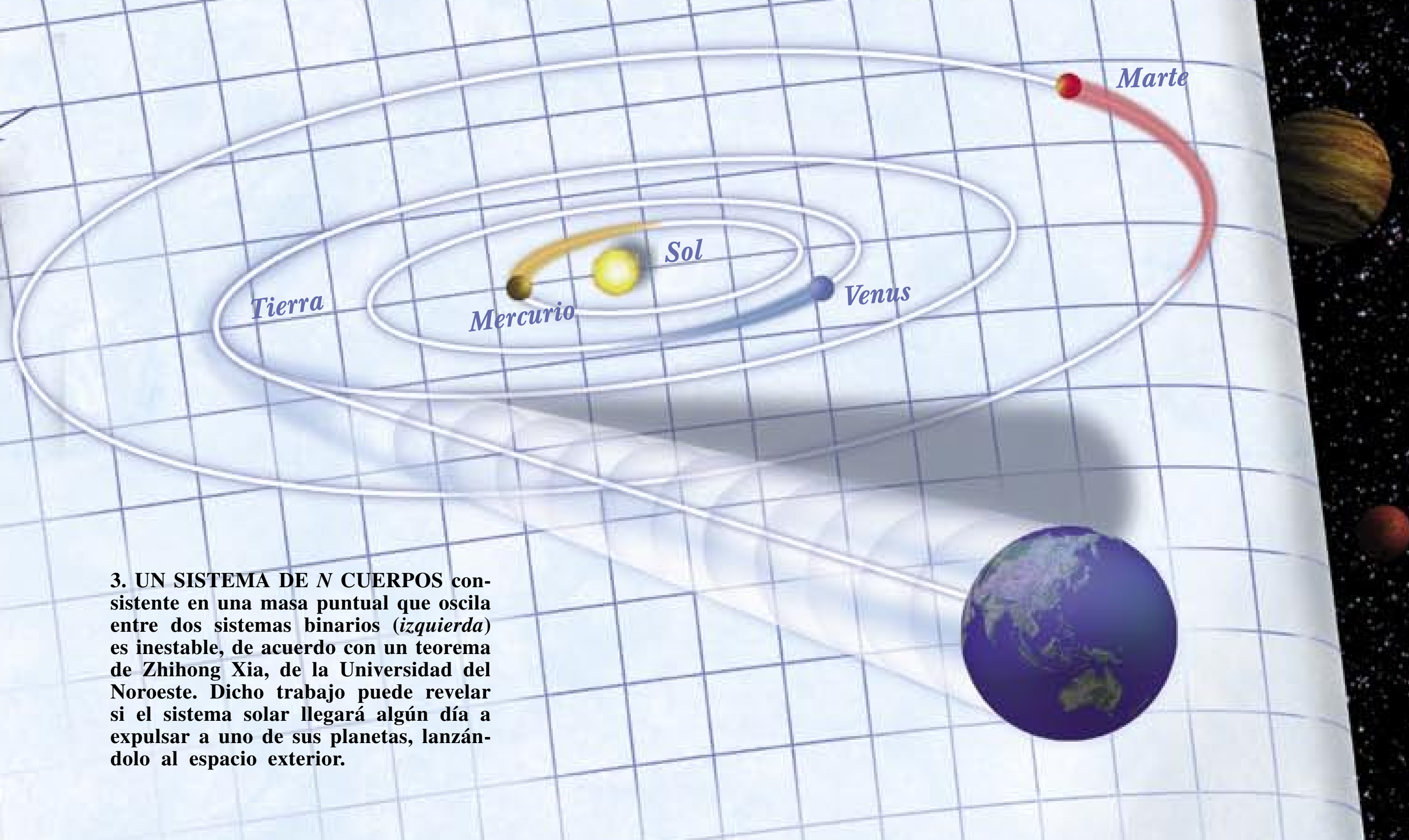
Lo que estos ejemplos muestran es que, si queremos buscar en el mundo real cuestiones imposibles de responder científicamente, hemos de establecer una cuidadosa distinción entre el mundo de los fenómenos humanos o naturales y los modelos matemáticos o computacionales de tales mundos. Los objetos del mundo real consisten en magnitudes directamente observables, como el tiempo o la posición, o en magnitudes, como la energía, deducidas a partir de aquéllas. Nos basamos, pues, en parámetros, ya sean las medidas de posición de los planetas o la configuración realmente observada de una proteína. Tales elementos observables constituyen, por lo general, un conjunto discreto de medidas que toma valores en cierto conjunto finito de números. Además, tales medidas no son, por lo general, exactas.

En el mundo de la matemática, por otra parte, tenemos representaciones simbólicas de estos observables del mundo real, en las cuales es frecuente suponer que los símbolos pertenecen a un continuo en el espacio y en el tiempo. Los símbolos matemáticos representativos de atributos como la posición y la velocidad presentan, de ordinario, valores expresados mediante números enteros, números reales o números complejos, sistemas, todos ellos, que contienen una colección infinita de elementos. En matemáticas, la noción preferida para caracterizar la incertidumbre es la aleatoriedad.

Está, finalmente, el mundo de la computación, que ocupa la curiosa posición de tener un pie apoyado en el mundo real de las herramientas físicas y otro en el mundo de los objetos matemáticos abstractos. Si concebimos la computación como la ejecución de un conjunto de reglas, es decir, de un algoritmo, tal proceso es de naturaleza puramente matemática y pertenece al mundo de los objetos simbólicos. Pero concebida como un proceso de cierre y apertura de conmutadores en la memoria de una máquina computadora real, se trataría de un proceso firmemente arraigado en el mundo de los observables físicos.

Una vía para poner de manifiesto si una cuestión es lógicamente imposible de responder por medios científicos consiste en restringir toda la discusión y argumentación al mundo de los fenómenos naturales. Al tomar tal camino nos está prohibido traducir a enunciados matemáticos cuestiones como "¿Es estable el sistema solar?" y, en consecuencia, generar respuestas con el mecanismo de demostración lógica de las matemáticas. Nos enfrentamos entonces con el problema de hallar un sustituto en el mundo real para la noción de demostración matemática.

La noción de causalidad puede constituir una candidatura adecuada. En principio, cabe considerar que una cuestión admite respuesta científica



3. UN SISTEMA DE *N* CUERPOS consistente en una masa puntual que oscila entre dos sistemas binarios (*izquierda*) es inestable, de acuerdo con un teorema de Zhihong Xia, de la Universidad del Noroeste. Dicho trabajo puede revelar si el sistema solar llegará algún día a expulsar a uno de sus planetas, lanzándolo al espacio exterior.

si podemos producir una cadena de argumentos causales cuyo eslabón último es la respuesta a la cuestión. Los argumentos causales no tienen por qué estar expresados en términos matemáticos. Por ejemplo, el clásico silogismo, "Todos los hombres son mortales; Sócrates es hombre; por consiguiente, Sócrates es mortal", es una concatenación causal. En ella no se utilizan matemáticas; sólo lenguaje ordinario. Por otra parte, sin el concurso de las matemáticas, la construcción de un argumento causal convincente puede ser tarea amedrentadora. En el caso de la estabilidad del sistema solar, por ejemplo, se requiere hallar definiciones no matemáticas convincentes de los planetas y la gravitación.

En vista de semejantes dificultades, parece prudente examinar métodos que conjuguen el mundo de la naturaleza con el de las matemáticas. Si para zanjar una cuestión atinente al mundo de la realidad deseamos apelar a la maquinaria demostrativa de las matemáticas, será preciso empezar "codificando" la cuestión, plasmándola en cierta formalización matemática, como una ecuación diferencial, una gráfica o un juego N-personal. Abordamos la versión matemática del problema valiéndonos de los instrumentos y técnicas de este rincón concreto del mundo matemático y, finalmente, "descodificamos" la solución (¡si la tenemos!) devolviéndola a términos del mundo real. ¿Cómo saber si los modelos matemáticos de un sistema natural y el sistema propiamente dicho guardan relación entre sí? He aquí un antiguo arcano filosófico, cuya resolución entraña el desarrollo de una teoría de modelos. Además, los argumentos matemáticos pueden estar sometidos a las restricciones que Gödel, Turing y Chaitin han revelado; ignoramos todavía si el mundo real sufre constricciones similares.

La mente no computacional

Tal vez exista forma de esquivar estas dificultades. Los problemas que Gödel y otros identificaron valen para sistemas numéricos con infinitos elementos, como el conjunto de los números enteros. Pero en muchos de los problemas del mundo real, así el problema del viajante, interviene un número finito de variables, cada una de las cuales sólo puede tomar un número finito de valores.

Análogamente, las modalidades de razonamiento no deductivo —por ejemplo, la inducción, en la cual saltamos a una conclusión general partiendo de un número finito de observaciones concretas— pueden llevarnos más allá del dominio de la indecidibilidad lógica. Así pues, si restringimos nuestros formalismos matemáticos a sistemas que utilicen conjuntos finitos de números, a la lógica no deductiva o a ambas cosas, toda cuestión matemática tendría que admitir respuesta; podemos esperar, por consiguiente, que también hallará respuesta su homólogo descodificado del mundo real.

Puede que los estudios de la mente humana revelen otros métodos para circunvalar los límites impuestos por la lógica. Ciertos defensores de la inteligencia artificial han sostenido que nuestros cerebros son ordenadores, si bien extraordinariamente perfeccionados, que efectúan cálculos según el mismo proceso lógico, secuencial, que los ordenadores tradicionales (e incluso que las redes neuronales o los procesadores en paralelo). Pero diversos teóricos, y muy señaladamente el físico-matemático Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, han aducido que la actividad cognitiva humana no se basa en reglas de deducción conocidas y no está sujeta, por consiguiente, a limitaciones gödelianas.

Tal punto de vista se ha visto recientemente reforzado por estudios realizados conjuntamente por el autor, la psicóloga Margaret A. Boden, de la Universidad de Sussex, el matemático Donald G. Saari, de la Universidad del Noroeste, el economista Åke E. Andersson y otras personas, amparados por el Instituto de Estudios Futuros, de Estocolmo. Nuestro trabajo induce fuertemente a pensar que, ni en las artes, ni en las ciencias naturales, ni en las matemáticas, la capacidad creativa humana se encuentra sometida a las rígidas limitaciones de los cálculos computarizados. Penrose



4. WILLIAM SEALY GOSSET (1876-1937), más conocido entre los cultivadores de la estadística a través de su pseudónimo “Student”, que da nombre a una famosa prueba —la “t” de Student— de particular aplicación en biometría.

y otros teóricos han conjeturado que la creatividad humana proviene de ciertos mecanismos o reglas desconocidos aún, quién sabe si relacionados con la mecánica cuántica. Al desvelar tales mecanismos e incorporarlos en el método científico, puede que los científicos logren resolver problemas aparentemente inabordables.

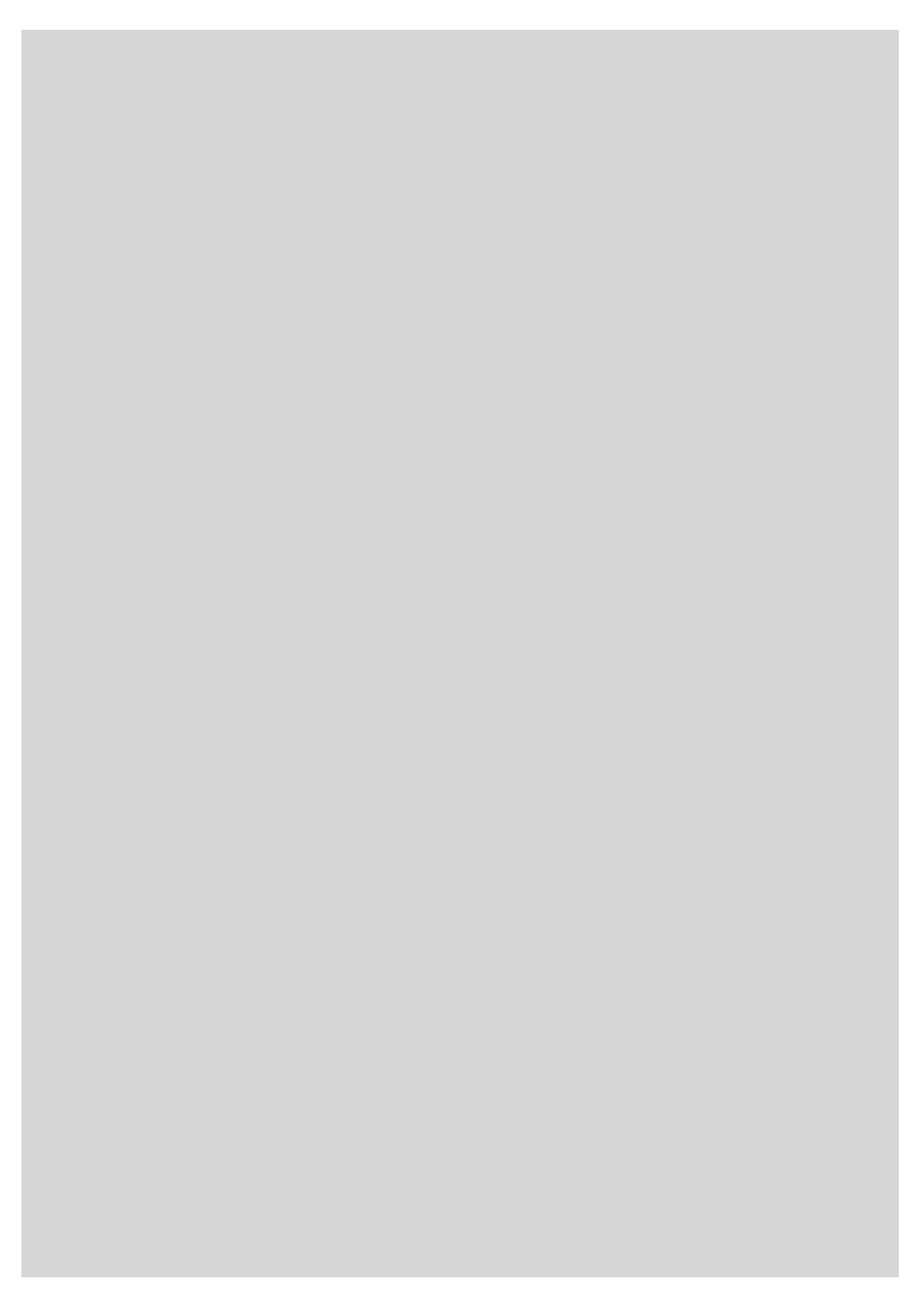
Evidentemente, la capacidad de la ciencia para calar en los secretos de la naturaleza está limitada por multitud de consideraciones prácticas, tales como el error de las mediciones, la duración de los cómputos, los recursos materiales y económicos, la voluntad política y los valores culturales. Pero ninguna de estas consideraciones guarda relación con la existencia de barreras lógicas que impidan dar respuesta a una cierta cuestión relativa al mundo natural. Por mi parte, sostengo que no las hay. ¡Así que, después de todo, un paseo por la matemática del siglo XX tal vez no resulte tan inquietante!

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SEARCHING FOR CERTAINTY. John L. Casti. William Morrow, 1991.

RANDOMNESS AND UNDECIDIBILITY IN PHYSICS. K. Svozil. World Scientific, Singapur, 1994.

BOUNDARIES AND BARRIERS. Dirigido por John L. Casti y A. Karlqvist. Addison-Wesley, 1996.



El ruido 1/*f*

El origen de esta señal aleatoria, de enorme interés por su ubicuidad y propiedades matemáticas, sigue siendo un misterio, a pesar de la atención que se le ha dedicado

Edoardo Milotti

Hagamos un experimento elemental. Tomemos una radio, enchufémosla y sintonicemos una banda en la que emitan pocas emisoras; por ejemplo, en onda larga. Cambiemos lentamente la sintonía. Unas veces la emisión nos llegará con nitidez; otras, sin embargo, la señal será muy débil y a duras penas distinguible, si no es un murmullo sordo, un ruido. Lo que oímos sólo es la traducción sonora de una señal eléctrica que los circuitos del receptor envían a los altavoces; observada en la pantalla de un osciloscopio, esta señal podría parecerse a la de la izquierda de la figura 2.

Una señal ruidosa es desordenada, no se repite nunca del mismo modo y, sin embargo, posee características que permiten clasificarla. Si nos fijamos en la figura, caeremos en la cuenta de que este tipo de ruido no se separa mucho de cierto nivel. En efecto, si medimos varias veces la amplitud, encontraremos que ésta se distribuye alrededor de un valor medio y que sigue una distribución de probabilidad gaussiana: un ruido como el de la figura citada se llama ruido blanco gaussiano. Se trata de un tipo muy común.

Volvamos a nuestro receptor. Continuamos oyendo el ruido e intentamos manipular el control de tono: oímos siempre un murmullo uniforme, aunque diverge de vez en cuando según la posición del botón. ¿Qué sucede en ese caso?

La respuesta es que la señal de ruido puede descomponerse en componentes sinusoidales de frecuencia distinta, exactamente como cualquier otra señal. El control de tono nos permite filtrar estas componentes: por ejemplo, cuando regulamos el tono en los bajos, se eliminan las componentes que oscilan a frecuencias altas, y el ruido así filtrado muestra una forma como la del recuadro de la figura 3. (Las funciones sinusoidales en las que puede descomponerse la señal reciben el nombre de componentes de Fourier.)

Todo esto nos permite comprender por qué se llama blanco el ruido que se muestra a la izquierda en la mencionada figura 2: en él se hallan presentes por igual todas las componentes en las diversas frecuencias, a la manera en que en la luz blanca todos los colores se encuentran con igual intensidad.

Obviamente, cuando filtramos el ruido blanco obtenemos un ruido que ya no es blanco, sino “de color”. El ruido gaussiano queda plenamente caracterizado mediante su densidad espectral (o espectro de potencia), una función que muestra cómo la potencia total de la señal se distribuye entre las distintas componentes de diversa frecuencia. La densidad espectral del ruido blanco es constante, mientras que el espectro del ruido blanco filtrado representado en la figura 3 a la derecha es una función que decrece cuando aumenta la frecuencia.

Abundan los fenómenos físicos que generan ruido. Muchos producen un ruido casi blanco; otros engendran ruidos de color. Entre estos últimos destaca sobre todo el ruido 1/*f*: ocurre en este ruido de color que la potencia correspondiente a una determinada componente de Fourier de frecuencia *f* es inversamente proporcional a *f*, y la densidad espectral tiene un aspecto sumamente sencillo cuando se la representa en un gráfico doblemente logarítmico, pues se reduce a una recta con pendiente igual a –1.

Existen otros ruidos de color similares al ruido 1/*f*, los llamados ruidos de centelleo (*flicker noises*), para los cuales la potencia de una componente de Fourier *a* con frecuencia *f* es inversamente proporcional a f^a (con $0,5 < a < 1,5$); lo mismo que en el caso del ruido 1/*f*, la densidad espectral representada en un gráfico con escalas doblemente logarítmicas se reduce a una recta con pendiente igual a $-a$.

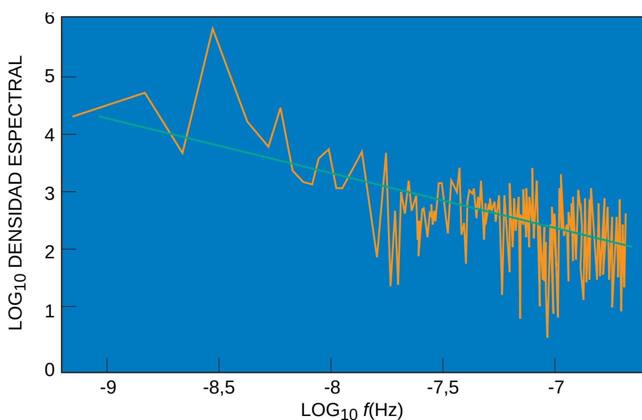
Observaciones experimentales del ruido 1/*f*

La primera observación del ruido 1/*f* se remonta a 1925, cuando J. B. Johnson se percató de su presencia al estudiar las fluctuaciones de corriente en la emisión termoiónica de los tubos de vacío. En 1926, W. Schottky trató de darle una interpretación teórica. Diez años más tarde, C. J. Christensen y G. L. Pearson lo observaron en micrófonos y en resistencias al carbono. Desde entonces, el sistema típico para realizar medidas del ruido 1/*f* es el circuito que aparece en la figura 5: lo que se observa es una fluctuación de tensión en los extremos de una de las dos resistencias (podemos considerarlo indistintamente una fluctuación de corriente o una fluctuación de la resistencia R_c). En los experimentos realizados con dos resistencias de capa fina, el ruido medido es casi exactamente un ruido tipo 1/*f*, y esta región del tipo 1/*f* se extiende al menos a seis órdenes de magnitud.

Para sorpresa de todos, se descubre que semejante comportamiento apenas si depende de la muestra de material usado; diríase mejor que es función de las dimensiones geométricas de la resistencia (cuanto menor es ésta tanto más neto se hace el ruido 1/*f*).

Todavía más desconcertante resulta la ubicuidad del ruido 1/*f*, que aparece en sistemas muy alejados del circuito de la figura 5. Tal propiedad halló explicación gracias a los trabajos de Benoît B. Mandelbrot

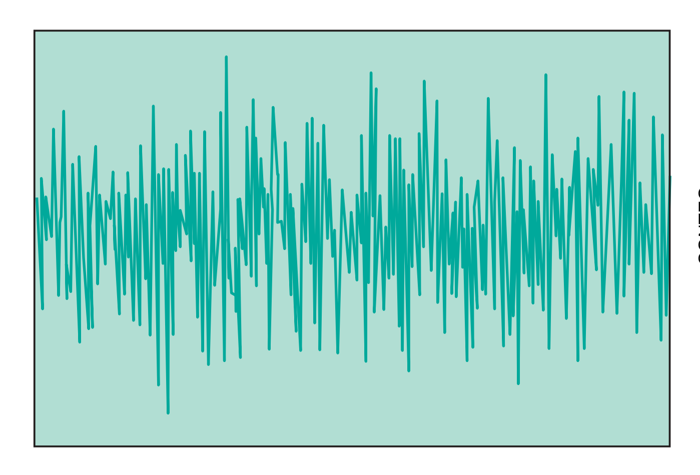
EDOARDO MILOTTI, del departamento de física de la Universidad de Trieste, desarrolla su labor investigadora en Instituto Nacional de Física Nuclear, dentro del dominio de las partículas elementales y mecánica estadística.

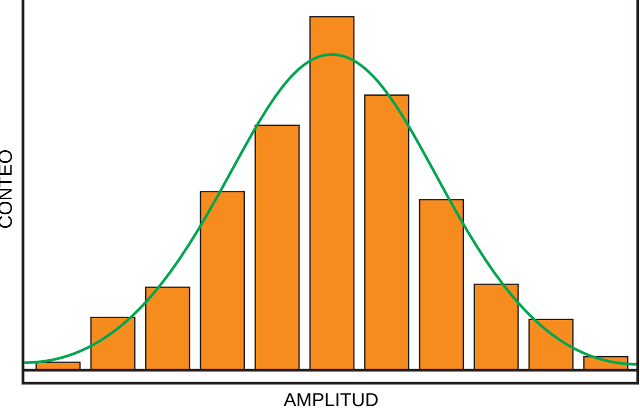


1. LAS MANCHAS SOLARES no aparecen siempre con la misma frecuencia. Su número varía con un período de unos once años. Para medir la actividad solar se usa el número de Wolf: si *G* indica el número de grupos de manchas solares y *M* el número de manchas solares visibles en un cierto instante, entonces el número de Wolf viene dado por la fórmula $R = 10\,G + M$. A la derecha se muestra la densidad espectral del número de Wolf medido en el período comprendido entre enero de 1953 y agosto de 1995: el segmento negro corresponde a la forma de un espectro del tipo 1/*f* y, por tanto, el número de Wolf tiene un espectro cercano a 1/*f*. Las oscilaciones rápidas, visibles sobre todo a frecuencias más altas, se deben a un efecto estadístico, mientras que el pico que se aprecia para frecuencias muy bajas corresponde a una periodicidad undecenal. La fotografía, realizada con el espectroscopio reticular instalado a bordo del *Skylab*, representa el espectro de la luz emitida por la superficie solar.

sobre fractales en los años setenta. Una lista, ciertamente incompleta, de los fenómenos que manifiestan la presencia de ruido 1/*f* va desde las fluctuaciones de resistencia en semiconductores, al latido cardiaco, la corriente en las fibras nerviosas, el nivel de insulina en sangre de un diabético, el flujo de las corrientes oceánicas, el ruido sísmico, las oscilaciones del eje terrestre, la actividad solar, el flujo del Nilo en los últimos 2000 años, la luz que proviene de las enanas blancas, el flujo de savia descendente en una clepsidra, el flujo del tráfico en carretera, el flujo de corriente en disoluciones iónicas, las uniones de Josephson y la luz que proviene de los cuásares.

A estos fenómenos se han añadido, en los últimos años, numerosos tipos





2. REPRESENTACION DE UNA SEÑAL de ruido blanco gaussiano en la pantalla de un osciloscopio: el eje horizontal corresponde al tiempo, mientras que en el eje vertical se indica la amplitud de la señal (*izquierda*). Para obtener esta figura se ha muestreado 500 veces un proceso que produce ruido blanco: la característica principal de este tipo de ruido estriba en que carece de memoria: la amplitud de cada muestra es independiente de la amplitud de las muestras precedentes. Se trata, además, de un ruido gaussiano, lo que significa que las amplitudes se distribuyen en torno a su valor medio siguiendo una densidad de probabilidad gaussiana (*derecha*). Esta es una propiedad de muchos procesos físicos que producen señales de ruido, fenómeno que acontece siempre que el proceso físico macroscópico viene determinado por la superposición de un gran número de procesos físicos microscópicos, independientes entre sí.

especiales de procesos no lineales. Además, no hay que olvidar el trabajo de R. F. Voss y J. Clarke en el que se demostró que también el sonido y la voz transmitidos a través de la radio presentan un espectro del tipo $1/f$.

Las matemáticas del ruido $1/f$

Se han esbozado muchos modelos físicos para explicar la presencia del ruido $1/f$, sobre todo en las resistencias y en los semiconductores. Se trata, casi siempre, de modelos especializados que no llegan a explicar por qué el ruido $1/f$ aparece en procesos tan diferentes. Una explicación genuina de la universalidad del ruido $1/f$, si existe, debe tener en cuenta bastantes hechos experimentales, en particular:

a) el ruido $1/f$ es casi siempre gaussiano. Esto parece indicar que el ruido $1/f$ resulta, sobre todo, de la superposición de muchos procesos elementales y parece excluir mecanismos de generación debidos a dinámicas no lineales;

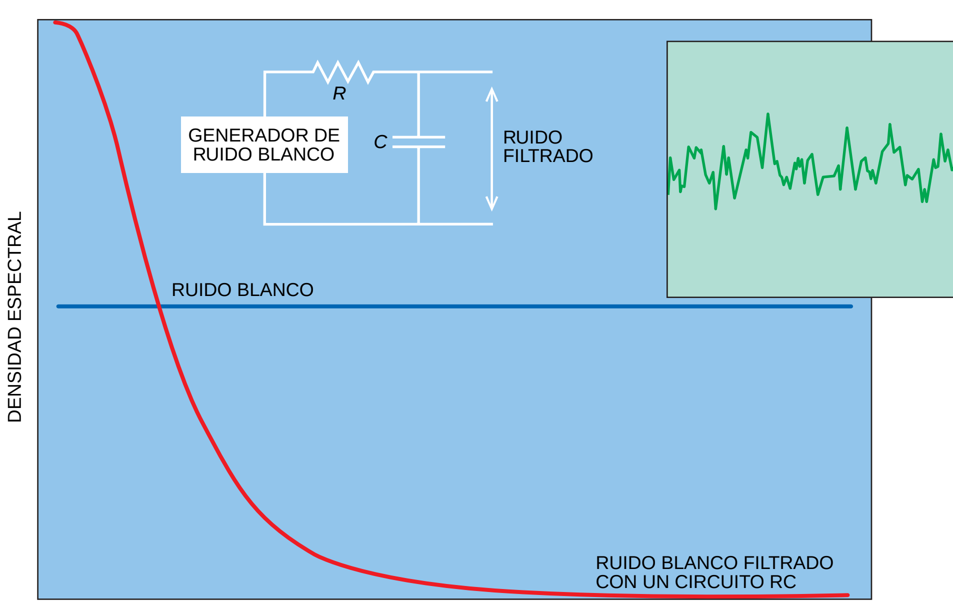
b) el ruido $1/f$ es estacionario. Esto quiere decir que, en promedio, sus características permanecen constantes a lo largo del tiempo;

c) no suele evidenciarse un aplanamiento del espectro en bajas frecuencias. Observaciones cuidadosas del ruido $1/f$ en semiconductores muestran que se extiende hasta las más bajas frecuencias perceptibles en el laboratorio (aproximadamente 10^{-7} hertz);

d) es difícil observar experimentalmente densidades espectrales que sean de la forma $1/f$. Lo habitual es dar con espectros del tipo $1/f^{a}$ con $0{,}8 < a < 1{,}4$.

A estas condiciones experimentales hay que sumar un dato: en un sistema físico donde a la amplitud del ruido pueda asociarse una potencia (y, por tanto, una energía), un "auténtico" ruido $1/f$ tiene una característica bastante indeseable. El problema se presenta al considerar la potencia total que se halla sumando la potencia que acarrea cada componente de Fourier.

Para entenderlo mejor, partamos de un ruido blanco. Sus componentes de Fourier tienen, en promedio, la misma potencia, independientemente de la frecuencia, y por ende la potencia total de la señal de ruido blanco es infinita. En realidad para el ruido blanco esa paradoja no se da, puesto que no existe ningún ruido que sea genuinamente blanco y la potencia puede mantenerse la misma sólo hasta determinada frecuencia máxima. En



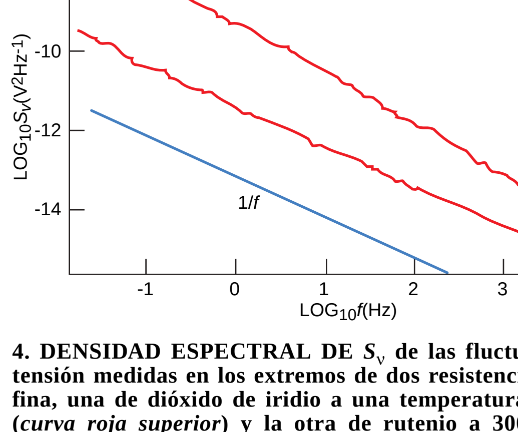
3. DENSIDAD espectral del ruido de la figura 2 a la izquierda, después de haberlo pasado por un filtro pasivo *RC*. En el recuadro se muestra la señal tras la operación de filtrado. Han desaparecido las oscilaciones más rápidas, asociadas a las componentes de Fourier de frecuencia más alta, y el ruido presenta un aspecto más regular.

efecto, las frecuencias muy elevadas sólo se dan en sistemas físicos que responden con suma velocidad a las perturbaciones y, como antes o después se dejará sentir la inercia de cualquier sistema físico, cuando tal suceda la densidad espectral deberá necesariamente anularse.

Algo análogo le acontece al ruido $1/f$ a frecuencias altas. Por idéntico motivo, tampoco en este caso deberemos preocuparnos. El problema del ruido $1/f$ es que la densidad espectral crece indefinidamente cuando la frecuencia tiende a cero; puede demostrarse que, por esa razón, la potencia total tiende a infinito. En este caso, sin embargo, no hay razones físicas que nos ayuden a explicar dicho efecto.

Por otra parte en los sistemas físicos observables la energía total (y la potencia) es finita; no puede entonces existir un auténtico ruido $1/f$ para esos sistemas, igual que tampoco existe el ruido blanco. Lo que se puede suponer es que a frecuencias suficientemente bajas deberemos observar un aplanamiento de la densidad espectral, de suerte que el ruido producido por el sistema se convierta en ruido blanco y que la potencia final resulte finita.

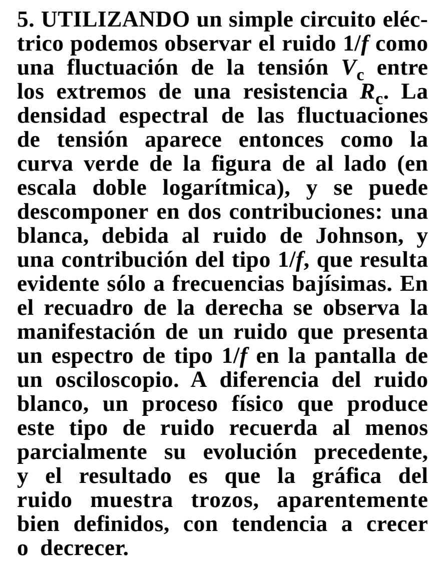
Por último, para responder a la cuestión de la universalidad el mecanismo matemático no debe referirse a ningún modelo físico específico.

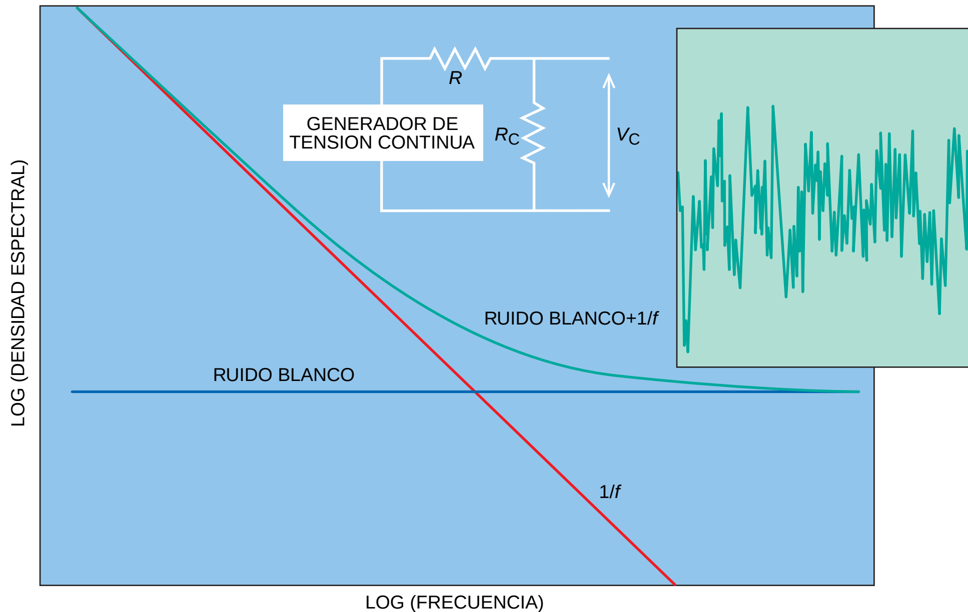


4. DENSIDAD ESPECTRAL DE S_V de las fluctuaciones de tensión medidas en los extremos de dos resistencias de capa fina, una de dióxido de iridio a una temperatura de 556 K (*curva roja superior*) y la otra de rutenio a 300 K (*curva roja inferior*). El segmento azul corresponde a la pendiente que cabría esperar en un espectro del tipo $1/f$. Como se puede apreciar, los espectros experimentales coinciden bastante con espectros $1/f$. Nótese que la pendiente permanece casi igual en una región que abarca casi seis órdenes de magnitud. (Los datos se han tomado de un artículo de B. Pellegrini, R. Saletti, P. Terreni y M. Prudenziati publicado en *Physical Review B*, vol. 27, página 1233, 1983.

Veamos a continuación cómo realizar matemáticamente un proceso aleatorio que genere ruido del tipo $1/f$. Partimos de dos observaciones: la primera es que resulta fácil realizar algo que produzca ruido blanco, y la segunda es que en la naturaleza existen muchos sistemas físicos que se pueden "cargar" y que, al dejarlos libres, se descargan lentamente siguiendo una ley exponencial. Tomemos una sucesión de impulsos breves que llegan al azar e independientes unos de otros: esto es un ruido blanco, y podemos usar cada impulso para cargar un sistema físico que se descarga exponencialmente. El resultado se muestra en la figura 6: las descargas individuales asociadas a cada impulso se suman dando una curva de respuesta global. El sistema físico con descarga exponencial transforma el ruido blanco en un ruido diferente, cuya densidad espectral es del tipo $1/f^2$. Este resultado parece muy prometedor, ya que, partiendo de un proceso aleatorio sencillísimo, "casi" hemos llegado al ruido $1/f$. Sin embargo, pasar del ruido $1/f^2$ al $1/f$ es más difícil de lo que parece, porque se requiere una hipótesis adicional muy fuerte y difícilmente justificable: que la curva de descarga sea cada vez diferente, como si el sistema cambiase de características al pasar de un impulso a otro.

Un sistema físico idealizado (propuesto por el autor) como el de la figura 7 a la izquierda tiene precisamente una curva de descarga diferente cada vez. El sistema está constituido por varios elementos, todos iguales, que pueden cargarse según lo expuesto y que se descargan todos del mismo modo. Los elementos se comunican entre sí y parcialmente con el exterior, de forma que los impulsos pueden proceder del exterior o de otro nodo que se está descargando. Además, se supone que las conexiones entre nodos se ven perturbadas por un ruido blanco y que, por tanto,


5. UTILIZANDO un simple circuito eléctrico podemos observar el ruido $1/f$ como una fluctuación de la tensión V_c entre los extremos de una resistencia R_c. La densidad espectral de las fluctuaciones de tensión aparece entonces como la curva verde de la figura de al lado (en escala doble logarítmica), y se puede descomponer en dos contribuciones: una blanca, debida al ruido de Johnson, y una contribución del tipo $1/f$, que resulta evidente sólo a frecuencias bajísimas. En el recuadro de la derecha se observa la manifestación de un ruido que presenta un espectro de tipo $1/f$ en la pantalla de un osciloscopio. A diferencia del ruido blanco, un proceso físico que produce este tipo de ruido recuerda al menos parcialmente su evolución precedente, y el resultado es que la gráfica del ruido muestra trozos, aparentemente bien definidos, con tendencia a crecer o decrecer.

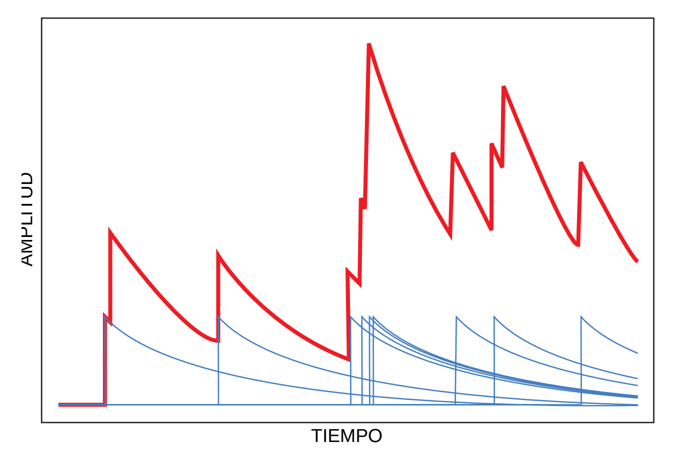


la carga se transfiere de un nodo a otro de manera parcialmente aleatoria. El número de conexiones entre un nodo y otro puede ser variable, así como la importancia de la conexión puede ser mayor o menor, pues la transferencia de carga puede acaecer más o menos fácilmente (pero estas dos ultimas no son características esenciales del modelo).

Un sistema de ese tipo recuerda, al menos en parte, su propio pasado. Tras descargarse un nodo, al tiempo que carga a su vecino, podría luego volver a recargarse a su vez por ese mismo vecino, quedando así directamente influido por lo que sucedió con anterioridad. Por esta razón, aun cuando todos los nodos se descarguen siempre del mismo modo, el sistema se comporta globalmente como si tuviese diferentes tiempos de descarga.

Se puede demostrar que una red que presente la forma de un retículo cuadrado bidimensional produce exactamente un ruido $1/f$, al menos en una banda de frecuencias. Fuera de esa banda, la densidad espectral se aplana para frecuencias muy bajas, mientras que adquiere una forma del tipo $1/f^2$ para frecuencias altas. Este comportamiento resulta muy conveniente, pues evita divergencias lo mismo en altas que en bajas frecuencias.

Es obvio que el intercambio de la carga hacia adelante y hacia atrás entre nodos adyacentes es tanto más eficaz a la hora de establecer una "memoria" cuanto más difícil le resulte a la carga salir del sistema. Puede demostrarse que la extensión de la región central $1/f$ es tanto mayor cuanto más próximo se halle el sistema de ser un sistema cerrado. Otras redes —ordenadas o desordenadas— con diferente conectividad muestran el mismo comportamiento general; la forma de la zona central es del tipo $1/f^a$, con $0,5 < a < 1,5$.

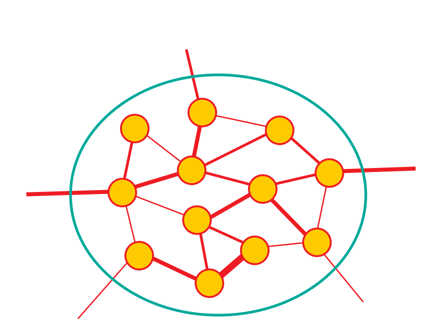


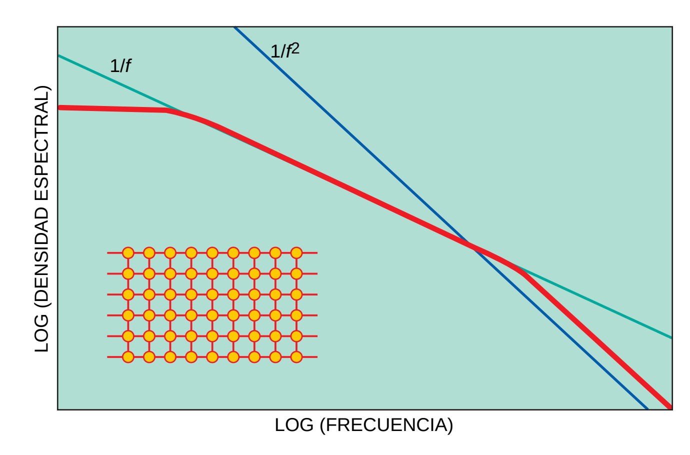
6. MUCHOS SISTEMAS FISICOS, al ser "cargados", presentan una curva de relajación que sigue una ley exponencial. Cuando un sistema físico con esa característica se excita mediante una sucesión de impulsos breves que llegan al azar, responde a cada impulso del mismo modo, y la curva de respuesta global (*rojo*) viene dada por la suma de las curvas individuales de respuesta exponencial (*azul*).

Mediciones de precisión

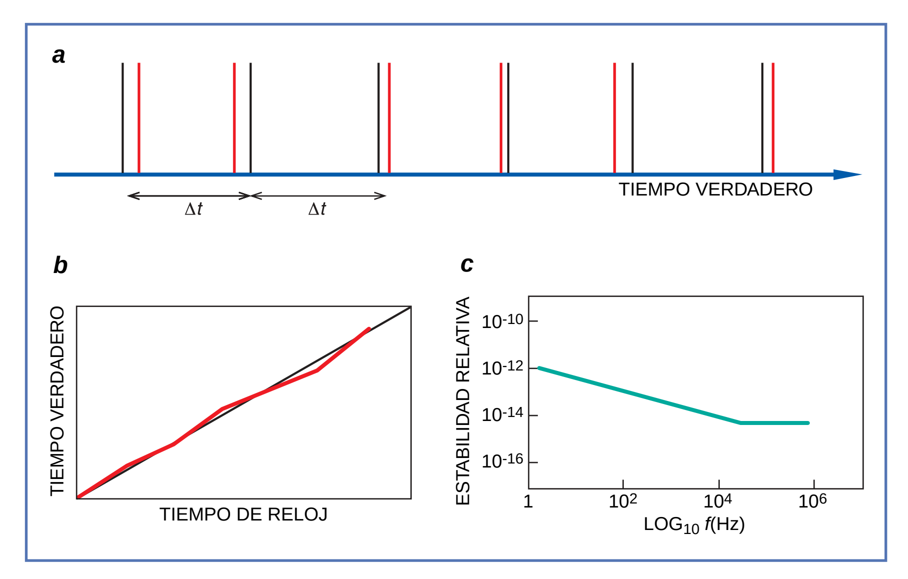
Hasta los aparatos de medida, mecánicos o electrónicos, llega la influencia del ruido $1/f$, fenómeno que acarrea consecuencias de notable interés en el caso de mediciones de precisión. Tomemos, a modo de ejemplo ilustrativo, la medición precisa del tiempo.

Si un reloj fuera perfecto, daría impulsos a intervalos fijos. La verdad es que los relojes sufren perturbaciones provocadas por señales ruidosas y dan impulsos a intervalos irregulares (*véase la figura 8*). La estabilidad relativa de un reloj es una medida de la variación del número de impulsos que aquél proporciona dentro de un intervalo temporal fijo. Si el ruido que perturba al reloj es un ruido blanco, entonces el número de impulsos variará mucho en intervalos breves, mientras que al aumentar la longitud del intervalo temporal los errores tienden a compensarse entre sí y a anularse; por consiguiente, el reloj es más estable en tiempos largos que en tiempos breves. En otras palabras, extendiendo la duración de la medida, el error relativo en el tiempo medido se hace cada vez menor. Por contra, si el ruido es





7. RED cuyos nodos pueden interaccionar entre sí (pueden pasarse la "carga" de uno a otro) y algunos también con el exterior (*izquierda*). La línea verde sirve para separar idealmente el "interior" del "exterior". El número de conexiones entre nodos varía; la propia importancia de la conexión puede ser mayor o menor. La "carga" podría ser cierta cantidad de carga eléctrica, un fluido u otra cosa: el modelo genérico no se refiere a ningún sistema físico particular. La curva roja de la figura de la derecha muestra la densidad espectral que se obtiene para un retículo cuadrado bidimensional como el que se ha dibujado abajo a la izquierda cuando la "carga" que entra en el sistema contrarresta la carga que sale. La región central de la densidad espectral es exactamente del tipo $1/f$, pero se aplana a bajas frecuencias y pasa a ser del tipo $1/f^2$ a altas frecuencias. La extensión de la región del tipo $1/f$ depende de las características de entrada y salida de la red: cuanto más difícil resulta entrar o salir de la red, tanto más extensa es la región $1/f$.



8. UN RELOJ PERFECTO daría impulsos a intervalos regulares, como los que se indican en negro en *a*. Por contra, los relojes reales se ven perturbados por señales de ruido, y dan impulsos a intervalos irregulares, como son los indicados en rojo. La curva en rojo en *b* muestra el tiempo medido con un reloj real comparado con el tiempo verdadero, mientras la recta en negro representa el comportamiento de un reloj ideal. Si el ruido que perturba al reloj es blanco, la curva oscila rápidamente alrededor de la recta, y si nuestra medición se prolonga bastante estas oscilaciones rápidas son despreciables. Esto significa que, extendiendo la duración de la medición, el error relativo en el tiempo medido es cada vez menor. Sin embargo, si el ruido es del tipo 1/*f*, al extender la duración de la medición se introduce una cantidad cada vez mayor de ruido. Los dos efectos se compensan y, por tanto, el aumento de duración de la medición no conlleva aumento en la precisión. Este efecto se ilustra en *c*, donde se muestra la estabilidad relativa en frecuencias de un reloj atómico de cesio: la estabilidad aumenta al crecer el tiempo sobre el que se promedian los errores casuales, puesto que inicialmente es el ruido blanco el que limita la precisión de la medida. A partir de cierto momento, el ruido 1/*f* comienza a predominar y la estabilidad relativa permanece constante.

del tipo 1/*f*, extendiendo la duración de la medición se introduce simultáneamente una cantidad creciente de ruido.

Los dos efectos se compensan, sin que el alargar la duración de la medición comporte mejora alguna. Así, aumenta la estabilidad de un reloj de precisión al crecer el tiempo sobre el que se promedian los errores aleatorios, pues el ruido blanco es lo que limita la precisión de la medida. Sin embargo, a partir de cierto instante, el ruido 1/*f* empieza a adquirir importancia y la estabilidad relativa permanece constante.

Considerando la ubicuidad del ruido 1/*f* y la imposibilidad de eliminarlo en sistemas de medida mecánicos y electrónicos, se pueden extender análogas reflexiones a otros tipos de mediciones de precisión, de lo que se deduce que el ruido 1/*f* es mucho más que una simple curiosidad: ejerce una profunda influencia sobre nuestra capacidad de conocer a fondo la naturaleza.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FLICKER NOISES IN ASTRONOMY AND ELSEWHERE. H. Press William en *Comments on Astrophysics*, vol. 7, páginas 103-109, febrero 1978.

MÚSICA BLANCA, MÚSICA PARDA, CURVAS FRACTALES Y FLUCTUACIONES DEL TIPO 1/F. Martin Gardner en *Investigación y Ciencia*, junio 1978, páginas 104-113.

1/F NOISE AND OTHER SLOW, NONEXPONENTIAL KINETICS IN CONDENSED MATTER. M. B. Weissman en *Review of Modern Physics*, volumen 60, páginas 537-571, abril 1988.

LA MEDICIÓN EXACTA DEL TIEMPO. Waine M. Itano y Norman F. Ramsey en *Investigación y Ciencia*, septiembre 1993, páginas 44-51.

LINEAR PROCESSES THAT PRODUCE 1/F OR FLICKER NOISE. Edoardo Milotti en *Physical Review,* E, vol. 51, páginas 3087-3103, abril 1995.

Ciencia y empresa

Cables ópticos

Submarinos

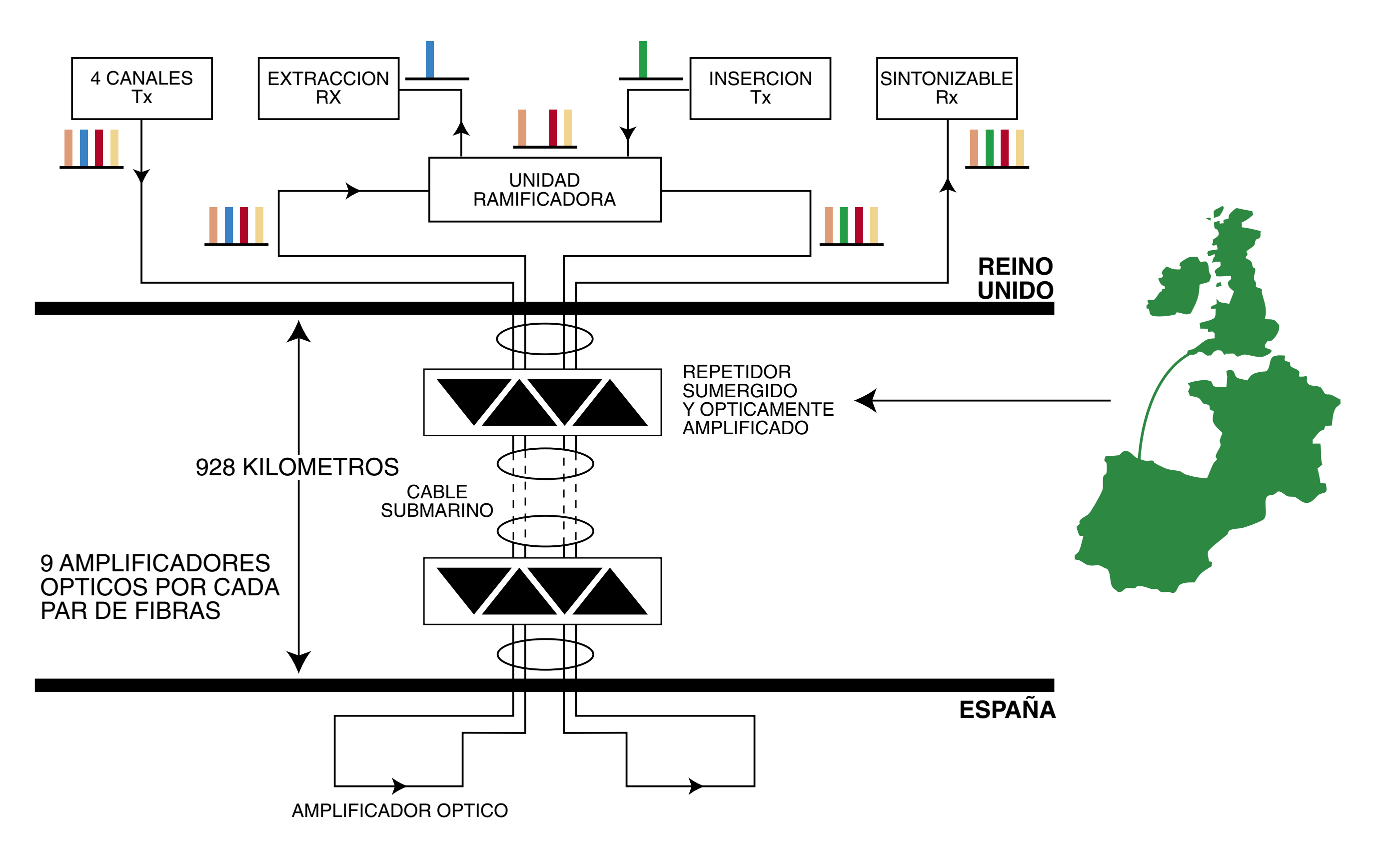
A lo largo de este otoño, un nuevo cable submarino, tendido desde Cabrera de Mar (cerca de Barcelona) hasta Punta Bergeggi (próxima a Savona), unirá España con Italia. No es el primer cable, ni será el último de los que atraviesan mares y océanos de nuestro planeta mientras continúe la tendencia hacia una mayor capacidad del sistema y aumenten las prestaciones y la flexibilidad de la red de telecomunicaciones.

España tiene ya una larga historia de 30 años en ese ámbito. A través de Telefónica de España S.A., se ha erigido en uno de los principales inversores en cables submarinos desde que en 1965 unió la península con las islas Canarias mediante el primer cable submarino moderno de telefonía: el PENCAN-1. Suministrado por Alcatel, poseía una capacidad básica de 160 circuitos de tres kilohertz. Telefónica trabaja ahora en el proyecto de su sexto enlace PENCAN, cuya capacidad prevista supera los 60.000 circuitos de 64 kilobits por segundo.

En 1986 comenzó el despliegue de los sistemas submarinos digitales de fibra óptica. De la península también llegó a Canarias uno de los primeros. Operaban entonces a 280 megabits por segundo con fibra estándar, sin compensación de la dispersión, con una longitud de onda de 1300 nanómetros y una capacidad básica de 3840 circuitos por par de fibra óptica (limitado a un total de cuatro pares de fibra por sistema). Para regenerar y resincronizar eléctricamente los impulsos ópticos, los sistemas de regeneración eléctrica llevaban repetidores sumergidos, y llegaron a alcanzar distancias entre repetidores de unos 100 kilómetros. Pero cinco años más tarde comenzaron a instalarse sistemas dotados de amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio; éstos utilizaban como fuente de bombeo un diodo semiconductor láser que opera a 1480 nanómetros.

La característica fundamental de la amplificación óptica reside en su transparencia a la velocidad del flujo de datos, lo que comporta una mayor flexibilidad de red. Las ampliaciones de la capacidad del sistema se reducen a un sencillo cambio de ciertos módulos en los equipos de transmisión en las estaciones terminales de cada extremo del sistema, siempre y cuando en el diseño inicial estuviera prevista dicha ampliación.

Telefónica se convirtió, asimismo, en el principal inversor en el primer sistema de Europa dotado de amplificación óptica. Denominada RIOJA, esta red submarina empezó a ofrecer servicio comercial entre España, Gran Bretaña, Bélgica y Holanda, en 1995. Aunque su configuración inicial era para 2,5 gigabits por segundo, dicha capacidad podrá



1. Diagrama de la prueba de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) a 10 gigabits por segundo en el sistema submarino RIOJA



2. Muestra del cable que se instalará en el sistema submarino de telecomunicaciones "Barcelona-Savona"

doblarse cuando las necesidades de tráfico lo requieran.

Se recurrió a este sistema para realizar un experimento en el segmento de unión entre España y Gran Bretaña (928 kilómetros de longitud), en el que se proponía someter a prueba la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) con la prestación de inserción/extracción y a una velocidad de línea de 10 gigabits por segundo. La WDM permite incorporar, en una sola fibra, varias longitudes de onda, lo que aporta una flexibilidad y capacidad adicional de la red. Hoy se puede ya multiplexar hasta ocho longitudes de onda en la misma fibra para aplicaciones comerciales.

El experimento en el sistema RIOJA sirvió para evaluar la transmisión de cuatro longitudes de onda, cada una de las cuales operaba a 2,5 gigabits por segundo, a través del enlace de 928 kilómetros. Más tarde, se concatenaron los cuatro pares de fibra óptica para realizar el mismo experimento con una distancia total de transmisión de 3700 kilómetros; ensayo éste que resultó todo un éxito. Asimismo, se sometió a prueba la viabilidad de la función de inserción/extracción WDM (W-ADM) con re-encaminamiento de la longitud de onda. Tras 1850 kilómetros de transmisión (Gran Bretaña-España-Gran Bretaña), se extrajeron datos de uno de los cuatro canales y a su vez se insertaron nuevos datos en la misma longitud de onda, para su propagación a través de otros 1850 kilómetros. Desde entonces se ha probado la WDM en distancias transoceánicas.

La amplificación óptica ofrece otra ventaja: proporciona enlaces más largos sin electrónica activa en el fondo del mar. Se han ensayado con éxito en el laboratorio sistemas "sin repetidores" para distancias que superan los 500 kilómetros a 2,5 gigabits por segundo. Telefónica ha empleado ya esta técnica en su red nacional, principalmente entre la península y las islas Baleares.

El nuevo cable, de 21,5 milímetros de diámetro y 760 kilómetros de longitud, que unirá Cabrera de Mar con Punta Bergeggi lo están suministrando las empresas Alcatel Submarine Networks y Maristel SpA. En ese sistema se incorporarán siete repetidores submarinos con amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio. El sistema será de jerarquía digital síncrona (SDH), con capacidad de partida de 2,5 gigabits por segundo por cada par de los dos pares de fibra óptica, aunque preparado para doblar dicha capacidad.

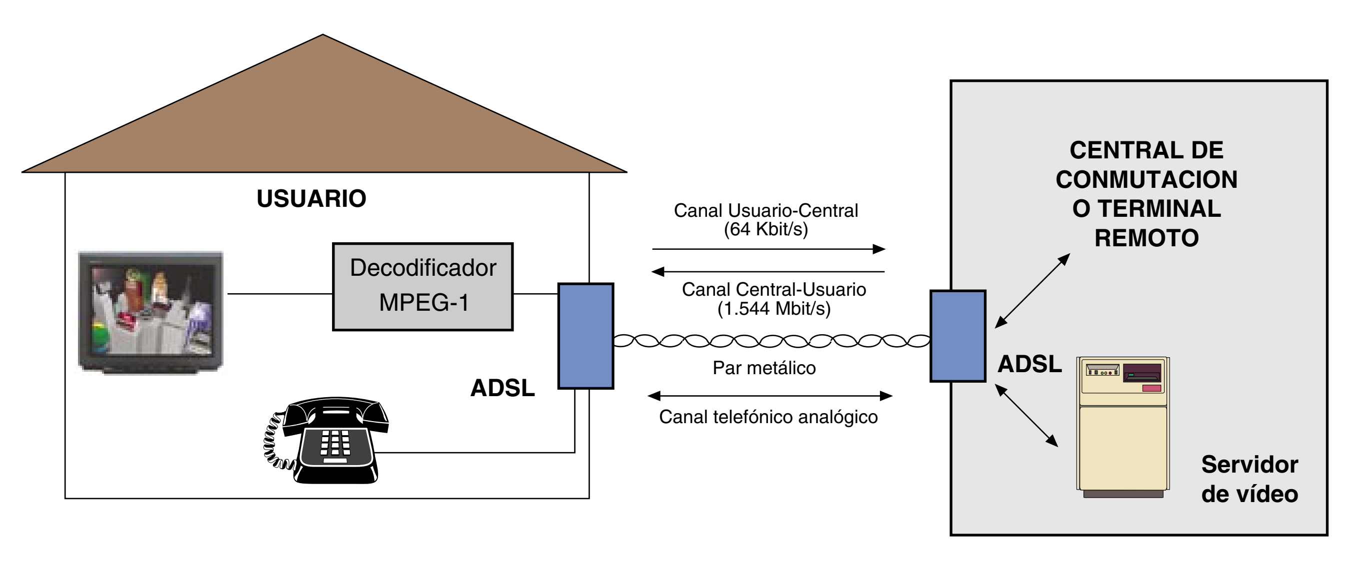
BRUCE RAW
Alcatel Cable Ibérica
Madrid
(Alcatel Submarine Networks)

Red telefónica

Bucle de abonado

De unos años a esta parte se ha difundido hasta la saciedad la expresión "autopistas de la información" para designar los sistemas de comunicaciones, actualmente en desarrollo, con capacidad para transmitir, de manera casi instantánea, una cantidad ingente de información, se sirva ésta a través de datos, audio o vídeo.

Cuando nos referimos a dichas autopistas, la mayoría de nosotros pensamos en enlaces de fibra óptica y damos por sentado que no podremos acceder a ellas hasta que estas redes ópticas se introduzcan en nuestros hogares. Desde luego, nos parece absurdo pensar en realizar tal acceso utilizando los pares de cobre que nos conectan a la red telefónica básica. Pero, ¿lo es realmente? ¿No podríamos aprovechar la red telefónica de cobre para enviar y recibir a través de ella tasas de información lo suficientemente eleva-



Configuración de un servicio de distribución digital de televisión sobre un par de hilos de cobre empleando módems ADSL.

Integración multisensorial heterogénea

En robótica, se entiende por integración multisensorial la utilización de la información proporcionada por múltiples sensores, en un instante determinado o a lo largo del tiempo. Esta información permite construir y mantener actualizada una descripción completa y precisa del entorno para que el sistema robotizado pueda ejecutar correctamente tareas relacionadas con dicho entorno.

El interés de integrar datos procedentes de múltiples sensores, en lugar de utilizarlos por separado, viene dado por la existencia de redundancia y complementariedad en la información manejada. Gracias a la información redundante podemos reducir la incertidumbre asociada a los datos sensoriales y, de ese modo, incrementar la precisión y fiabilidad del sistema perceptual en su conjunto. Merced a la información complementaria se perciben características del entorno que no podrían obtenerse si los mismos sensores se trataran de manera independiente.

Las formas de integración multisensorial más comunes son las de decisión, guiado y fusión. Los métodos de decisión se basan en la selección de los datos proporcionados por un sensor específico, de acuerdo con la credibilidad asociada a los datos generados por cada uno de los sensores disponibles. Los métodos de guiado utilizan los datos proporcionados por un sensor para dirigir la adquisición o procesamiento de información a través de otros sensores. Estas técnicas se han venido aplicando tradicionalmente a la integración de sensores heterogéneos, tales como visión y tacto, o visión, proximidad y fuerza. Por último, los métodos de fusión persiguen la agregación de diferentes fuentes de información en una representación unificada o, alternativamente, la combinación de esa información de acuerdo con los datos aportados por cada sensor.

Muchos de los métodos de fusión sensorial están diseñados para combinar información de la misma naturaleza. Esto significa que la información sensorial de entrada y las estimaciones resultantes son de un único tipo, o bien que es posible definir funciones matemáticas para convertir unos tipos en otros.

El ámbito de la fusión multisensorial heterogénea, que se refiere a la combinación de información de diferente naturaleza, ha recibido menos atención de los expertos que el de la fusión homogénea; la razón de ello estriba en la dificultad de encontrar un modelo analítico general que pueda aplicarse. Tradicionalmente, la fusión heterogénea se ha realizado mediante redes neuronales o métodos simbólicos (combinación de grafos o sistemas de reglas).

Una de las aportaciones del Instituto de Cibernética de la Universidad Politécnica de Cataluña dentro del campo de integración multisensorial se ha cifrado en el diseño de un modelo de representación del entorno y de un conjunto de técnicas complementarias que hacen posible la fusión de información multisensorial heterogénea en diferentes niveles de abstracción.

El modelo del entorno propuesto está estructurado como un árbol de cajas englobantes y orientadas. Cada caja mantiene información global y local asociada a su volumen englobado. La información global comprende un conocimiento geométrico (por ejemplo, área o volumen total de los objetos contenidos en la caja), paramétrico (por ejemplo, peso total en el volumen englobado) o de procedimiento (por ejemplo, algoritmos de planificación de trayectorias o evitación de obstáculos aplicables a los objetos de la caja). Ambas, la estructura del árbol y la información global contenida en sus nodos, se han representado simbólicamente mediante marcos ("frames"), utilizando un lenguaje de especificación de sistemas basados en el conocimiento. Esto simplifica el acoplamiento del modelo propuesto del entorno con sistemas de inferencia simbólica, habituales en el desarrollo de los módulos de planificación y control en sistema robotizados complejos.

La información local asociada a cada caja consiste en la descripción de una superficie que proporciona

das como para posibilitar todo tipo de servicios multimedia?

Desde un punto de vista teórico la respuesta es afirmativa. El límite teórico superior de la tasa de información posible en un canal ruidoso viene dado por el teorema de capacidad de Shannon. (Así llamado en honor de Claude Elwood Shannon, quien propuso una definición matemática de la información para calcular la tasa de información máxima en canales ruidosos.) Teniendo en cuenta todas las degradaciones o ruidos que se pueden presentar en el bucle de abonado, dicho límite para un par de cobre trenzado, del tipo de los usados en telefonía, y con una longitud de 3 kilómetros, es aproximadamente 7,9 megabits por segundo o 2,5 megabits por segundo, según la trasmisión sea unidireccional o bidireccional. Para longitudes inferiores, esta cota aumenta de forma espectacular y así, por ejemplo, para una longitud de 100 metros y una transmisión unidireccional es mayor que 100 megabits por segundo.

¿Y desde un punto de vista práctico? ¿Existen sistemas que, construidos sobre la red tradicional de abonado, alcancen unas prestaciones que se acerquen a las teóricas? La respuesta, gracias a la aplicación de métodos avanzados de tratamiento digital de la señal, es otra vez afirmativa, si bien dichos sistemas trabajan con tasas de información inferiores a las teóricas.

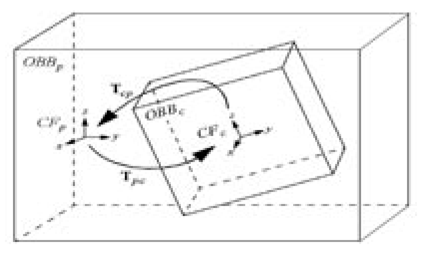
Los sistemas de transmisión bidireccional, con igual tasa de información para ambos sentidos, se denominan "líneas digitales de alta tasa de información para abonados" (HDSL). Se utilizan dos o tres pares y no requieren repetidores. En Estados Unidos los sistemas HDSL se han normalizado para tasas de información de 1,544 megabits por segundo, con la recomendación específica del Instituto Nacional de Normalización (ANSI) de una tasa de 784 kilobits por segundo para cada uno de los dos pares, con un alcance mínimo especificado de 2,74 kilómetros para pares de sección 0,4 milímetros. Cada par sirve bidireccionalmente ("full duplex") para reducir las interferencias de diafonía.

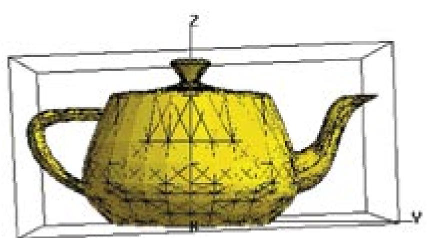
Por su parte el Instituto Europeo de Telecomunicaciones (ETSI) ha confeccionado la norma DRT/TM-3017, que define dos versiones del sistema HDSL: el de tres pares, cada uno de ellos con una tasa de información de 784 kilobits por segundo, o bien el de dos pares con una tasa de 1,168 megabits por segundo cada par. El alcance típico en estos casos, sin el recurso a repetidores, para calibres de 0,4 milímetros es de 4 kilómetros. Se trata de una técnica plenamente

información detallada sobre la forma de un objeto. El modelo propuesto permite la representación de superficies abiertas y cerradas de topología y género arbitrarios. Tales superficies se representan mediante mallas triangulares de puntos de control. Cada punto de control almacena las coordenadas de una posición en el espacio, así como información escalar, tal como color o rugosidad, asociada con ese punto. Además, esta información está complementada por un valor que indica la incertidumbre (o credibilidad) asociada.

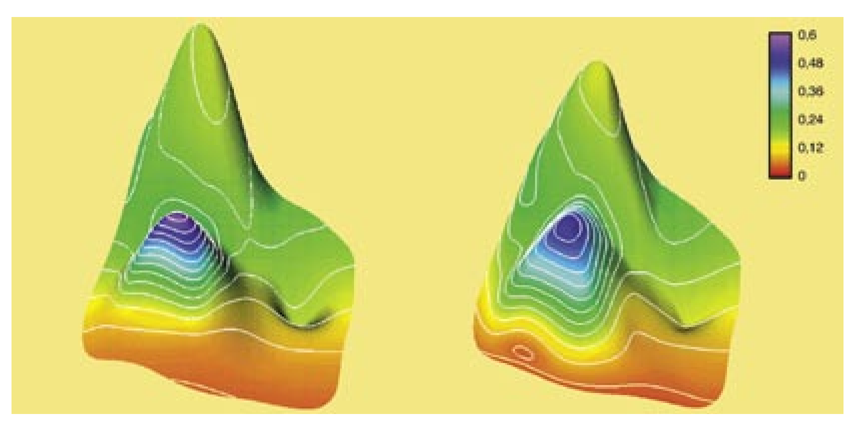
Las superficies de los objetos representados por mallas triangulares pueden reconstruirse mediante una nueva técnica de fusión geométrica de datos. Esta técnica genera una superficie suave a partir de la combinación local de puntos de control, teniendo en cuenta sus incertidumbres asociadas. El modelo geométrico anterior se ha generalizado para permitir la reconstrucción de las funciones escalares asociadas con las superficies tridimensionales. Ambas técnicas constituyen un nuevo modelo de integración multisensorial heterogénea orientado a la estimación de superficies de objetos tridimensionales y de funciones escalares definidas sobre ellas, a partir de información dispersa sujeta a incertidumbre.

Luis Basáñez
y Miguel Angel García
Instituto de Cibernética (UPC)





1. Modelo de representación del entorno estructurado como un árbol de cajas englobantes y orientadas. Cada caja mantiene información global y local asociada a su volumen englobado. La información global comprende conocimientos geométricos, paramétricos y de procedimiento. OBB_p y OBB_c designan las cajas padre e hijo, respectivamente, CF_p y CF_c sus sistemas de coordenadas y T_{pc} y T_{cp} las transformaciones directa e inversa entre dichos sistemas



2. Técnica de integración heterogénea. La imagen izquierda muestra una superficie sobre la que está definida una función escalar visualizada mediante colores e iso-contornos. Esta superficie representa un objeto presente en la escena real. Los diferentes sensores suministran la posición tridimensional y el valor escalar asociado en 25 puntos de control que permiten generar una malla triangular. La imagen derecha muestra la reconstrucción del objeto original (geometría y función escalar) tras aplicar la técnica de integración heterogénea desarrollada en el Instituto de Cibernética

desarrollada, aunque todavía no ha adquirido un gran volumen de negocio.

La técnica denominada "línea digital y asimétrica de abonado" (ADSL), que permite la transmisión de información de forma asimétrica en los dos sentidos de comunicación mediante un solo par, es más compleja que la HDSL, razón por la que no ha alcanzado todavía su grado de madurez. Por su asimetría, estos sistemas están pensados para la distribución de servicios de banda ancha que requieren una alta tasa de información hacia el abonado y una baja capacidad en el canal de retorno (por ejemplo, vídeo a la carta). Existen ya en funcionamiento sistemas que operan con tasas de información de entre 1,544 megabits por segundo y 6,144 megabits por segundo en el sentido central telefónica a usuario y entre 16 kilobits por segundo y 576 kilobits por segundo en el opuesto, todo ello sin la utilización de repetidores y para longitudes comparables a las abarcadas por los sistemas HDSL.

El hecho de que con ADSL se alcancen mayores velocidades de transmisión que en HDSL se debe a la reducción de diafonía que se experimenta al evitarse el solapamiento frecuencial entre las señales trasmitidas en ambas direcciones. Debemos resaltar que no se hace uso de la banda de frecuencias empleada para telefonía vocal (0 a 4 kilohertz), permitiéndose de este modo la transmisión simultánea de conversaciones telefónicas.

Para hacernos una idea más clara del potencial de las arquitecturas ADSL, conviene señalar que los sistemas que operan a una tasa de información de 1,544 megabits por segundo permiten la transmisión de vídeo codificado mediante la norma MPEG-1 ("Moving Picture Expert Group") con calidad similar a la ofrecida por un vídeo doméstico. Si el sistema opera a 6,144 megabits por segundo se puede trasmitir vídeo codificado mediante MPEG-2, ofreciéndose una calidad similar a la del vídeo profesional.

Una posibilidad sobre la que se está investigando en estos momentos es la de la utilización de redes híbridas de fibra óptica y pares de cobre. En esta arquitectura la central telefónica se enlaza mediante fibra óptica a un nodo electrónico situado cerca de un pequeño grupo de usuarios. El nodo demultiplexa la señal óptica y transmite a los usuarios la información recibida mediante pares de cobre de corta longitud (de 100 a 500 metros). En estas condiciones se ha comprobado, mediante simulación, que las velocidades de transmisión alcanzables se elevan de forma considerable,

llegándose en el caso de transmisión asimétrica (VADSL) sin utilizar repetidores a tasas de hasta 60 megabits por segundo para longitudes del par de cobre en torno a los 300 metros. Hay que señalar que la utilización comercial de esta arquitectura, que podría verse como un paso natural en la transición entre la red actual y una futura red totalmente óptica, no parece descabellada, puesto que muchas operadoras han desarrollado estratégicamente sus redes de fibra óptica de manera que la distancia entre los usuarios y la red es, en la mayoría de los casos, inferior a medio kilómetro.

El papel que estos sistemas van a desempeñar en las futuras autopistas de la información está todavía sin definir. En cierto modo se ven como un paso previo antes de la instalación de fibra óptica hasta el abonado. Sin embargo, en ciertos casos podrían utilizarse como soluciones finales. El factor económico se encargará probablemente de dar respuesta a estos interrogantes. Con todo, resulta curioso comprobar cómo la red de cobre, que se empezó a instalar hace ya 100 años y que en su origen se ideó para transmitir señales de voz, es capaz de adaptarse a los tiempos modernos y posibilitar, utilizando en sus extremos los módems adecuados, todo tipo de nuevos servicios.

JAVIER GARCÍA-FRÍAS
Y PEDRO M. CRESPO
Tecnología Multimedia
Telefónica Investigación
y Desarrollo, Madrid

Trombosis

Factores genéticos

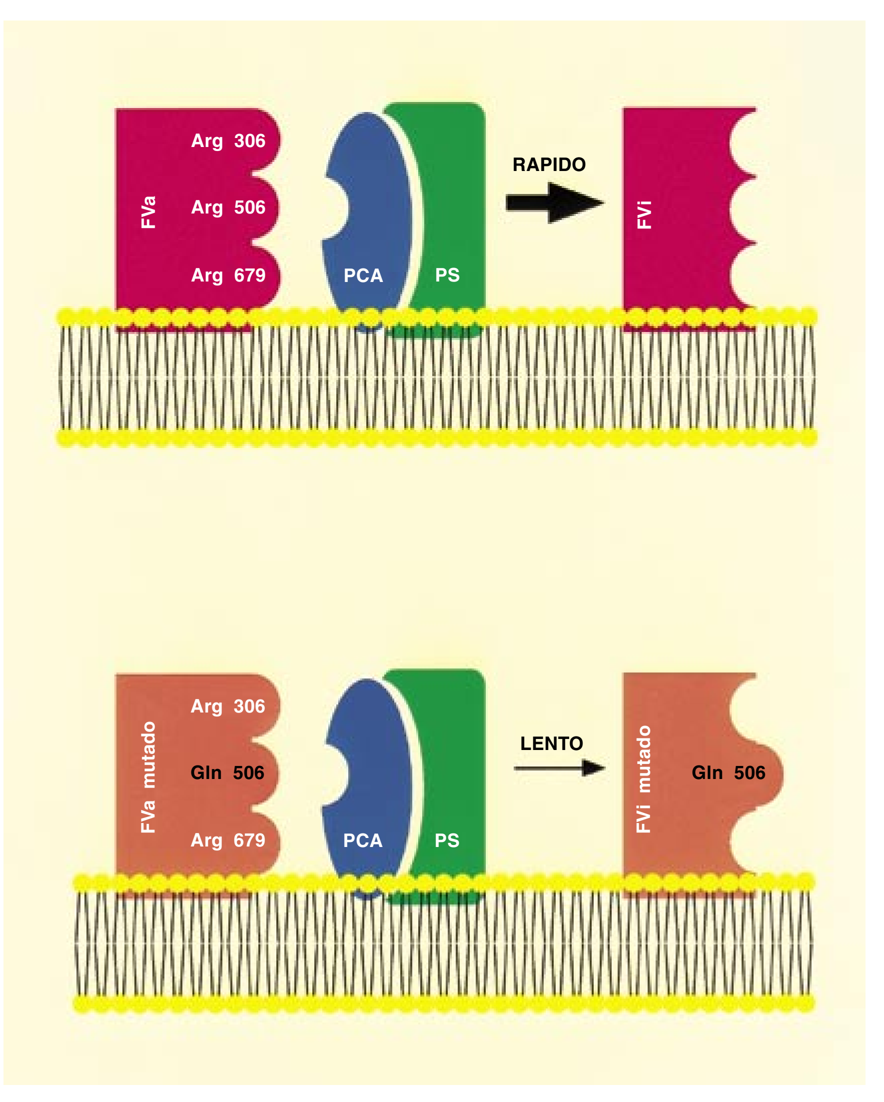
La trombosis venosa se ha convertido en un grave problema de salud pública. Constituye la tercera enfermedad más común del sistema cardiovascular, tras el infarto de miocardio y la embolia cerebral.

Además de la existencia de factores de riesgo circunstanciales —intervenciones quirúrgicas, traumas, inmovilización o embarazo—, hay factores genéticos que explican el frecuente carácter familiar de la trombosis. Entre los factores genéticos conocidos se encuentran las deficiencias en proteína C, proteína S y antitrombina III, tres polipéptidos que desarrollan una actividad anticoagulante. Pero hasta hace apenas tres años sólo podía diagnosticarse una causa genética en el 5-10 % de los enfermos. La situación ha cambiado radicalmente tras el descubrimiento de la resistencia a proteína C activada (PCA).

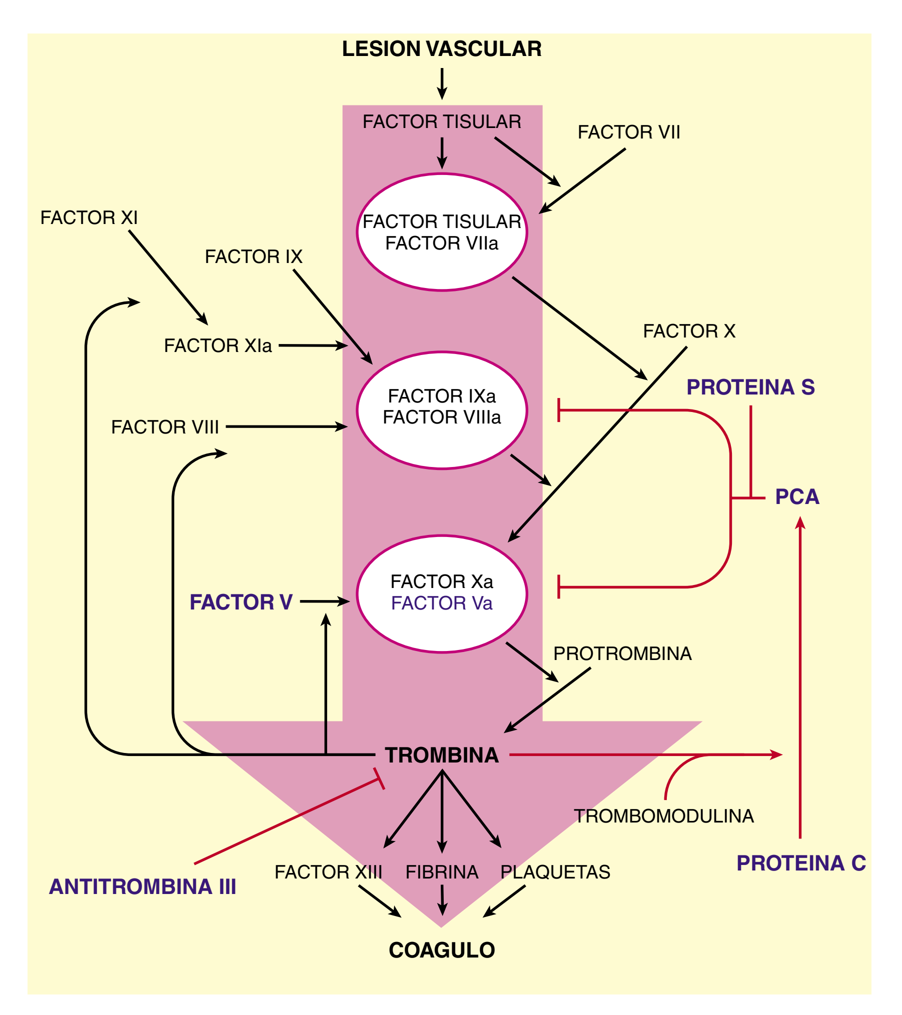
La cascada de la coagulación es un sistema de respuesta que se pone en marcha ante las lesiones provocadas en la estructura de los vasos sanguíneos. El resultado de dicha activación es una síntesis copiosa de trombina. Esta enzima constituye un elemento decisivo en la formación del coágulo: estimula las plaquetas, transforma el fibrinógeno en fibrina y activa los factores XI, VIII, V y XIII de la coagulación.

En lo vasos que no han sufrido daño alguno, sin embargo, la trombina ejerce el efecto opuesto. Se une a la proteína endotelial trombomodulina y se convierte en un potente activador de proteína C. La PCA, junto a su cofactor la proteína S, inhibe la coagulación al inactivar, mediante cortes específicos, los factores VIIIa y Va. La importancia del sistema anticoagulante de la proteína C se refleja en el aumento del riesgo de trombosis en las personas que presentan bajos niveles de proteínas C o S. Así pues, el equilibrio entre las propiedades pro- y anticoagulantes de la trombina limita la formación del coágulo al lugar dañado y evita la formación de trombos.

La resistencia a PCA se describió en el laboratorio de Björn Dahlbäck, de la Univesidad de Lund. Descubrió que la adición de esa proteína en forma pura al plasma de algunos pacientes con trombosis venosa no



1. La resistencia a proteína c *activada se debe a la presencia de una mutación en uno de los puntos de corte de PCA en factor V. En comparación al factor Va normal* (arriba), *el factor Va mutado* (abajo) *se inactiva lentamente por lo que su actividad procoagulante es más prolongada, aumentando el riesgo de que se formen trombos*



2. La cascada de la coagulación impide la pérdida de sangre al formar un coágulo que repara los vasos dañados. La trombina, proteína clave en el proceso, activa también un mecanismo de control anticoagulante (líneas rojas). *Las proteínas implicadas en la trombosis venosa se indica en azul*

aumentaba el tiempo de coagulación; es decir, la PCA no ejercía su función anticoagulante en tales casos. A esos sujetos se les denominó resistentes a PCA. El factor que producía la resistencia en cuestión se aisló en el mismo laboratorio y resultó ser factor V de la coagulación. El factor Va, que actúa como cofactor en la conversión de protrombina a trombina, es uno de los sustratos de PCA.

Poco después, el laboratorio de Rogier Bertina, de la Universidad de Leiden, describió la mutación puntual en el gen del factor V responsable de la resistencia a PCA. Esta mutación génica provoca en la proteína la sustitución, por el aminoácido glutamina, de la arginina que hay en la posición 506, uno de los tres lugares específicos donde corta PCA. Sin embargo, a pesar de la pérdida de un punto de corte en el factor Va mutado, la PCA mantiene su capacidad de inactivarlo cortando los otros dos, aunque a un ritmo menor. La disminución en la velocidad de inactivación del factor Va mutado por PCA es la causa del estado de hipercoagulación y del aumento del riesgo de trombosis en los individuos resistentes a PCA.

Desde el descubrimiento de la resistencia a PCA se le han consagrado más de 300 trabajos. Estos estudios han demostrado la importancia clínica de la resistencia a PCA. La distribución mundial de la mutación en el factor V es heterogénea; aparece con mayor frecuencia entre los caucasianos de Europa y América y está prácticamente ausente en otras razas.

A diferencia de otros defectos genéticos asociados con la trombosis, la resistencia a PCA tiene una elevada incidencia entre la población europea. Ser portador de la mutación en el factor V se asocia con un aumento en el riesgo de trombosis de 5-10 veces en heterozigotos y de 50-100 veces en homozigotos. A pesar de ello, la resistencia a PCA está considerada un factor de riesgo leve. En muchos casos de resistencia a PCA la trombosis venosa sólo se manifiesta si se produce una combinación con otros factores de riesgo, genéticos o circunstanciales. La relativa facilidad para diagnosticar la presencia de la mutación en el factor V responsable de la resistencia a PCA permitirá una mejor prevención de la trombosis venosa en los individuos que corren riesgo.

El descubrimiento y estudio de la resistencia a PCA ha confirmado el carácter multifactorial de la trombosis venosa. La severidad de esta enfermedad poligenética depende tanto del número como de la naturaleza de los factores de riesgo contribuyentes, algunos de los cuales están aún por descubrir.

CRISTINA APARICIO
Y PABLO GARCÍA DE FRUTOS
Departamento de Química Clínica
Universidad de Lund, Malmö
(Suecia)

Taller y laboratorio

Shawn Carlson

Creación de un vacío

No hay que darle vueltas; tarde o temprano, todo aficionado que se precie necesitará un sistema de vacío. Mecanismo indispensable si se propone el lector trabajar con haces de partículas, construir sus propios filtros ópticos o fabricar sus radiómetros, por mencionar algunas tareas. Pero estos sistemas tienen fama de ser complejos y costosos, lo que desanima a muchos aficionados a añadirlos al utilliaje de su laboratorio. No hay que rendirse. Hay sistemas de vacío suficientes para numerosos requisitos científicos que pueden construirse fácilmente y mantenerse con poco gasto. Les voy a presentar cómo construir un sistema capaz de conseguir presiones bajísimas, de sólo una diezmillonésima de atmósfera.

Tratándose de cámaras de vacío, limítese a los tamaños reducidos. Los volúmenes pequeños se hermetizan y evacuan más fácilmente. Por cámara de vacío puede servirnos un tarro de conservas de vidrio liso (o sea, sin dibujos, grabados o estrías que debiliten el vidrio). En una chatarrería adquiera una placa de aluminio de 25 milímetros de grueso; nos valdrá como base. La placa ha de ser mayor que la tapa del tarro. Asegure ésta a la placa de aluminio con una dosis generosa de epoxia aluminiada. La epoxia debe rezumar por igual alrededor de toda la tapa cuando coloque ésta presionándola con algún peso (unos libros viejos, por ejemplo). Limpie el exceso y espere que se seque la epoxia.

A continuación, abra un orificio de seis milímetros que atraviese la placa y la tapa por el centro. Si le es posible, rosque ese orificio con una terraja. En una ferretería, compre un tubo roscado de seis milímetros. Cubra de epoxia la rosca de ese tubo y rósquelo por el fondo de la placa base. Si no pudo aterrajar el orificio, emplee un tubo sin roscar y sujételo con pegamento. Unte una gota de epoxia alrededor del tubo conforme inserta éste para asegurarse de que el intersticio queda totalmente relleno de epoxia.

En una mesa de juego vieja recorte un agujero de doce milímetros de ancho y ponga sobre la mesa la placa base, de suerte que el tubo descienda atravesando el agujero. El extremo del tubo debe quedar a unos 25 centímetros del suelo. Si el extremo del tubo tiene roscas, córtelas y mate las aristas con una lima.

Los tarros de conserva ya están concebidos para que encierren vacío, por lo que probablemente no tendrá dificultad en roscar el tarro correctamente en su tapa. Si necesita presiones que se acerquen a las diez millonésimas de atmósfera, podría el aficionado precaverse contra las fugas minúsculas. Para ello, puede

1. Para evacuar un tarro de conservas de vidrio nos valdremos de un filtro molecular en nódulos. Para protegernos contra la implosión emplearemos un protector de plástico o una funda de almohada doblada

colocar una capa de cinta de teflón sobre la rosca de la tapa del tarro antes de atornillarlo. Quizá sea necesario verter antes una gota de grasa hermética a lo largo del borde de la boca del tarro para asegurarse un cierre estanco. Yo compré la grasa a Duniway Stockroom Corporation, de Mountain View, California.

Hay que tomar precauciones para el caso en que el tarro implosione. (Lo que acabará ocurriendo si realiza múltiples experimentos o si el tarro tiene algún defecto estructural.) Cuidado: en una implosión, pueden salir proyectados casi a la velocidad del sonido pequeños fragmentos de vidrio. Es, por tanto, absolutamente vital que mantenga la cámara bajo un escudo protector siempre que la evacue. Si no necesita ver el interior, una funda de almohada doblada sobre sí proporciona la protección necesaria. En otro caso, cubra el tarro con un recipiente de plástico de pared translúcida y gruesa, tal como una botella de refresco de tres litros a la que habrá cortado el cuello. Además, Ace Glass, de Vineland, New Jersey, vende (n.º de catálogo 13100-10) un recubrimiento plástico protector que impedirá la disgregación del vidrio en caso de catástrofe. Empléelo como complemento de otra protección, no como sustituto de ésta.

En muchas aplicaciones, las bombas de absorción constituyen el medio ideal para crear un vacío de calidad. Carecen de piezas móviles; operan mediante el enfriamiento de una sustancia, el llamado sorbente, hasta una temperatura en que absorbe los gases. Para esto sirve perfectamente el carbón activo, pero es mejor un filtro molecular. Los filtros moleculares se componen de pequeñas pastillas, o nódulos, con tan gran número de grietas y recovecos, que poseen unas superficies fantásticamente extensas; un nódulo de un gramo puede presentar una superficie superior a mil metros cuadrados.

Al enfriarse, las moléculas del aire quedan atrapadas en esas microsimas. Una cantidad de 50 gramos puede rarificar hasta los 10 militorr un volumen de un litro en 20 minutos. (La presión atmosférica es del orden de 760 torr.)

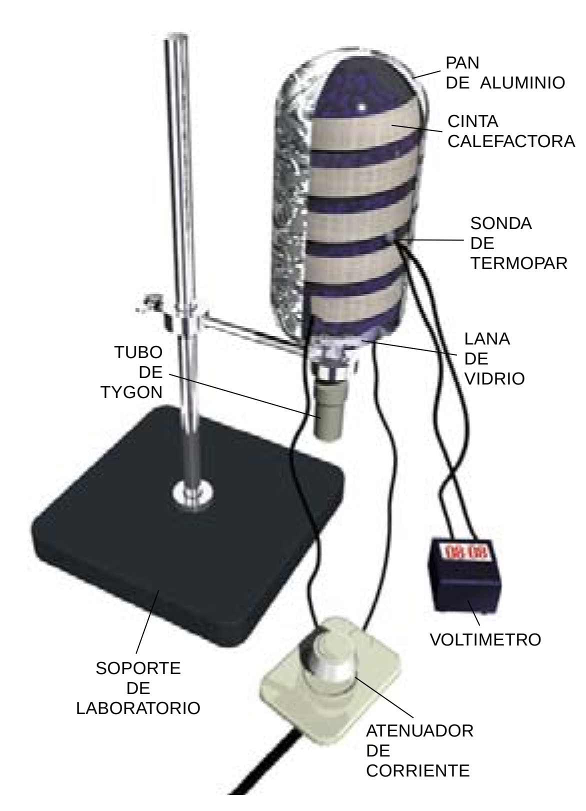
Para encerrar el sorbente, precisaremos una ampolla de pyrex de unos 25 milímetros de diámetro por noventa de largo provista de un cuello de vidrio de seis milímetros de diámetro. No le costará encontrar un taller de soplado de vidrio que se la suministre. Llénela con el sorbente, y rellene la parte superior con lana de vidrio para que el filtro molecular quede inmóvil. Por el tubo de vidrio introduzca un trozo corto de tubo flexible o tubo de tygon.

Antes de que podamos emplearlo, hemos de activar el filtro molecular, es decir, estufarlo. Recubra la ampolla con cinta calefactora; entre otros proveedores está Omega Engineering, de Stamford, Connecticutt (modelo n.º FGS0031-010). O bien aproveche el calefactor de una tostadora vieja que quizá duerma en el desván. En uno u otro caso, asegúrese de que la cinta no se cruce sobre sí misma y de que toda ella se halla en contacto con la ampolla. Conecte en el circuito un atenuador de intensidad para controlar la temperatura del calefactor.

Para controlar la temperatura, utilice una sonda de termopar (del estilo de Omega, modelo n.º 5TC-GG-30-36) conectado a un voltímetro digital. Coloque la sonda entre dos vueltas de la cinta calefactora y envuelva luego la ampolla con pan de aluminio. Sujete bien la ampolla de forma que el cuello apunte hacia abajo; conecte la corriente. Esta ajústela de manera que la tensión eléctrica en el termopar aumente en 18 milivolts, señal de que el filtro ha alcanzado la temperatura de estufado correcta de 350 grados centígrados. El calor expulsará las moléculas atrapadas, incluido el vapor de agua, que se condensará en el cuello de la ampolla y goteará hacia fuera. Deje conectado el calefactor hasta que el cuello esté completamente seco. Desconecte el calefactor y pince el tubo de tygon para que el filtro molecular no absorba humedad atmosférica mientras se enfría la ampolla. Ahora podemos ya conectarlo a la cámara de vacío.

El sorbente tendrá que enfriarlo con nitrógeno líquido. No se preocupe; el nitrógeno líquido es barato y fácil de obtener (busque en el epígrafe “Soldadura” de las Páginas Amarillas). Con un poco de tiento lo manejará sin peligro. Guárdelo en una nevera capaz: diez litros le durarán una semana. Asegúrese de que la vasija no tenga espita en el fondo. No cierre la tapa con fuerza excesiva y así evitará el riesgo de que suba la presión de ebullición del nitrógeno y reviente el contenedor.

Para extraer el aire del tarro de conservas, sumerja la ampolla de pyrex en el nitrógeno líquido. El filtro molecular aspirará entonces el aire de la cámara, produciendo un vacío de hasta 10 militorr.



2. Al calentar el filtro molecular se expulsa la humedad de los nódulos

Algunas indicaciones. Lave y seque a conciencia el conjunto de la cámara de vacío antes de emplearla, asegurándose de no tocar el interior con los dedos. Me informan de que una huella dactilar puede estar degasificando (evaporándose a baja presión) durante años si no se la elimina. Para expulsar la humedad, estufe la cámara por encima de los 100 grados C durante una hora. La epoxia degasificaría también, al igual que todos los cierres de plástico en la tapa del tarro y todos los recubrimientos del interior de la tapa. Minimice las superficies de esos materiales expuestas al vacío. Si cualquiera de esos materiales dejara expuesto más de un centímetro cuadrado, recúbralo con grasa hermética, que degasifica con mayor lentitud.

Podemos intercalar un vacuómetro entre la bomba y la cámara. Para medir presiones del orden de las decenas de militorr, necesitaremos un vacuómetro de termopar o un vacuómetro de Pirani. Se basan estos dispositivos en la conductividad térmica de los gases, que baja abruptamente de un valor constante, a un torr aproximadamente, hasta prácticamente cero a un militorr. Podemos comprar un vacuómetro de termopar

completo a Kurt J. Lester Company, de Clairton, Pennsylvania. Quien se maneje bien en electrónica puede ahorrarse algún dinero solicitando un tubo de vacío de termopar (n.º de pieza KJL5311) y construyendo luego un circuito de fuente de alimentación y amplificador sencillo. Sin embargo, los vacuómetros de Pirani son mucho más versátiles y resultan de construcción fácil y barata. De esto, les hablaré el mes que viene.

Como servicio a los lectores de Investigación y Ciencia, *la Society for Amateur Scientists ofrece un kit de una bomba de absorción completa, incluido un frasco de pyrex relleno de filtro molecular, cinta calefactora, un pequeño recipiente para nitrógeno líquido y tubo de tygon. No está incluida la cámara de vacío. El precio es de 70 dólares para pedidos internacionales (se incluyen gastos de envío). La oferta tiene validez hasta el 30 de septiembre de 1997.*

Para mayor información sobre sistemas de vacío, visite la página SAS World Wide Web en http://www.thesphere.com/SAS/ y la Bell Jar *en http// www.tiac.net//users/shansen/belljar/ Estoy muy agradecido a George Schmermund, aficionado de Vista (California), por su perspicaz conversación, y a Steve Hansen, redactor jefe de* Bell Jar, *boletín sobre experimentos acerca del vacío y la mejor publicación trimestral de ciencia aficionada que he visto.*

Nota de la redacción*: En el esquema del circuito de la fuente de alimentación del artículo de octubre "Detección de movimientos micrométricos", el microcircuito integrado inferior se rotuló incorrectamente como de tipo 7805 y debe ser 7905. El microcircuito superior está bien.*

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PROCEDURES IN EXPERIMENTAL PHYSICS. John Strong. Lindsay Publications, Bradley Ill., 1986 (originalmente publicado en 1938).

BUILDING SCIENTIFIC APPARATUS. J. H. Moore, C. C. Davis y M. A. Coplan. Addison-Wesley, 1989.

AN EXPERIMENTER'S INTRODUCTION TO VACUUM TECHNOLOGY. Steve Hansen. Lindsay Publications, 1995.

The Bell Jar. Publicación trimestral. Dirigido por Steve Hansen (35 Windsor Drive, Amherst, NH 03031).

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Monopoly: segunda aproximación

Expuse en el artículo de junio un modelo matemático del Monopoly, el conocido juego de tablero. Al principio, cuando todos los jugadores lanzan los dados para avanzar desde la SALIDA, la probabilidad de ocupar las casillas cercanas es elevada, mientras que las casillas alejadas permanecen vacías. Demostré, valiéndome de la noción de cadena de Markov, que este apiñamiento de probabilidades inicial acaba uniformizándose, con lo que el juego resulta equitativo, o matemáticamente equilibrado: todos los participantes tienen la misma probabilidad de ocupar una casilla dada y de adquirir la correspondiente propiedad. Sin embargo, tal resultado sólo es cierto si se introducen ciertas hipótesis simplificadoras. Los entusiastas del Monopoly se apresuraron a señalar que en el juego real las probabilidades a largo plazo no siguen una distribución uniforme.

¿Cuáles son, pues, las probabilidades verdaderas? El método de las cadenas de Markov es aplicable también al juego real; empero, he de advertir al lector que el análisis es complejo y requiere un importante apoyo informático. Antes que nada, séame permitido recordar cómo se aplican las cadenas de Markov en el Monopoly.

Un jugador puede ocupar cualquiera de las 40 casillas del tablero, que por comodidad vamos a numerar de 0 a 39 en el sentido de las agujas del reloj a partir del cuadro SALIDA (que será la casilla 0).

Dadas dos casillas cualesquiera, A y B, existe un valor numérico, llamado probabilidad de transición, que es la probabilidad de que un jugador que salga de A acabe su viaje en la casilla B al concluir su turno de lanzamiento de los dados. Si la jugada es imposible, la probabilidad de la transición será 0.

Hay en total $40 \times 40 = 1600$ probabilidades de transición, que admiten cómoda codificación en una matriz cuadrada M de 40 filas (hileras horizontales) y 40 columnas (verticales). Por ejemplo, el elemento situado en la sexta fila y la décima columna expresa la probabilidad de trasladarse en un turno desde la Estación de Goya hasta la Calle Bravo Murillo. En el momento de iniciarse la partida, cada jugador tiene probabilidad 1 de encontrarse en la casilla 0 y probabilidad 0 de encontrarse en cualquiera de las demás; tales probabilidades pueden codificarse mediante un vector $v = (1, 0,..., 0)$.

La teoría de las cadenas de Markov nos dice que la evolución de esta distribución de probabilidad está dada por la sucesión de vectores v, Mv, M^2v, M^3v..., y así sucesivamente: cada lanzamiento de los dados equivale a multiplicar una vez más la matriz M por el vector v. Los vectores resultantes pueden calcularse por los métodos matriciales habituales, disponibles en cualquier programa de cálculo algebraico de calidad. Tales programas permiten también calcular los autovalores y autovectores de la matriz M. Se dice que un vector u es un autovector de autovalor c si es distinto del vector 0 y existe un número c, que puede ser real o complejo, tal que $Mu = c \times u$. El teorema de Markov que desempeña papel clave es que la distribución de probabilidad a largo plazo está dada por el autovector cuyo autovalor sea de máximo valor absoluto.

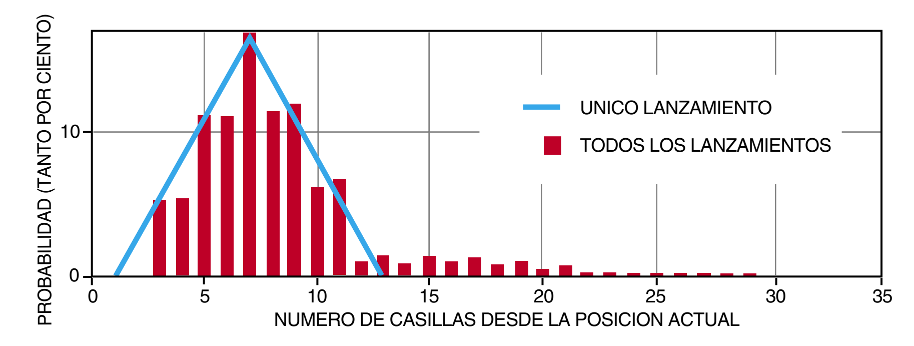


1. Es la Cárcel, con los muchos caminos conducentes a ella, lo que da su complejidad al Monopoly

Por consiguiente, para analizar si el Monopoly es un juego equitativo, todo cuanto hemos de hacer es calcular M y aplicar álgebra matricial. Esta labor era sencilla en el caso de mi modelo simplificado, pero en el juego real hemos de tener en cuenta la posibilidad de múltiples lanzamientos de los dados, la existencia de casillas especiales como VAYA A LA CARCEL y las instrucciones que figuran en las tarjetas que han de extraer los jugadores en el caso de que vayan a parar a las casillas SUERTE o CAJA DE COMUNIDAD.

Fueron muchos los lectores que me enviaron sus propios análisis del juego. Los más completos procedían de William J. Butler, de Portsmouth, Thomas H. Friddell, ingeniero de Boeing en Maple Valley, y Stephen Abbott, del departamento de matemáticas del St. Olaf College, de Northfield, en colaboración con Matt Richey. Butler preparó un programa en Pascal, Friddell se valió de Mathcad y Abbott utilizó Maple. La exposición subsiguiente es una síntesis de los resultados de todos ellos. (En todos los modelos del Monopoly se hacen ciertas hipótesis sobre el nivel de detalle a tener en cuenta; las diferencias entre los supuestos de los distintos corresponsales son insignificantes.)

La primera modificación de mi modelo inicial consiste en tomar plenamente en cuenta las reglas de lanzamiento de los dados. Se lanza un par de dados y, si el resultado es un doble, el jugador lanza de nuevo; empero, tres dobles consecutivos le harán aterrizar en la Cárcel. El lanzamiento de los dados constituye por sí mismo una pequeña cadena de Markov, que puede resolverse del modo habitual. El resultado es un gráfico de la probabilidad de trasladarse una distancia cualquiera dada a partir de la posición actual [*véase la figura 1*]. Notemos que, si bien la distancia más probable es 7, son posibles desplazamientos de hasta 35 casillas (sacando 6,6; 6,6;



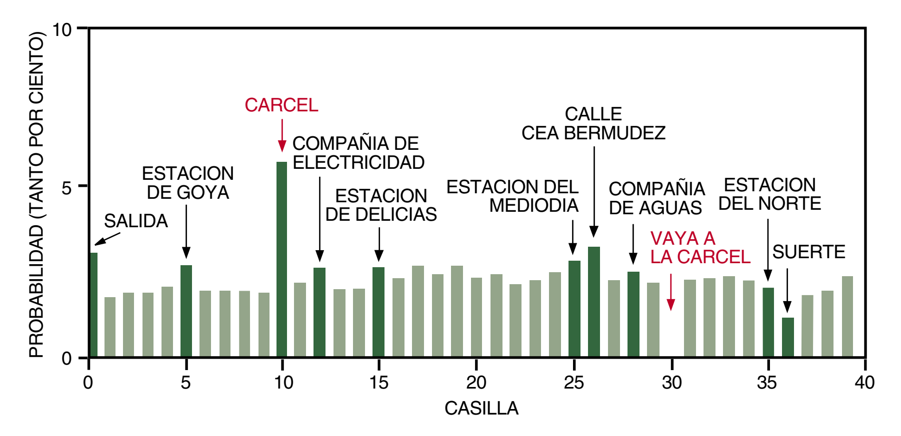
2. La probabilidad de trasladarse un determinado número de casillas en cada turno, tomadas en cuenta las reglas de lanzamiento de los dados, alcanza un máximo en el número 7. Cuando el jugador lanza un doble, ha de repetir la suerte. Pero tres dobles consecutivos le llevarán a la Cárcel

6,5). No obstante, las probabilidades de los desplazamientos mayores que 29 casillas son tan minúsculas, que no aparecen en el gráfico. Estos resultados se incorporan en M modificando adecuadamente los elementos de esta matriz.

A continuación, hemos de tener en cuenta el efecto de la casilla VAYA A LA CARCEL. Las reglas para ir a la Cárcel plantean un problema, porque los jugadores pueden optar entre pagar lo necesario para salir, o quedarse entre rejas y confiar en lograr un doble que les permita salir. (¡E incluso, en fases posteriores, cuando la Cárcel se convierte en un refugio para las rentas altas, pueden quedarse en ella y procurar que no les salga un doble!) Las probabilidades asociadas con esta elección dependen de la idiosincrasia del jugador, por lo que se trata de un proceso no markoviano. La mayoría de los corresponsales eludieron esta pega suponiendo que el jugador no abonaba el precio de la salida. En tal caso, la Cárcel deja de ser una casilla individual para convetirse en subproceso markoviano —una serie de tres casillas (virtuales) en las cuales los jugadores pasan de "Recién ingresado en la Cárcel" a "Llevo ya un turno en la Cárcel" y "Tengo que salir de la Cárcel en el próximo turno". La casilla VAYA A LA CARCEL propiamente dicha tiene probabilidad 0, porque en realidad no la ocupa nadie.

El paso siguiente consiste en modificar M para tomar en consideración las tarjetas SUERTE y CAJA DE COMUNIDAD, que pueden enviar al jugador a la Cárcel o a alguna otra posición del tablero. Este refinamiento se consigue sin dificultad (aunque laboriosamente) contando la proporción de tarjetas que envían al jugador a una casilla dada. La probabilidad extra se suma entonces a la correspondiente posición en M.

Una vez establecida con precisión una matriz de transición, podemos calcular las probabilidades del estado estacionario, sea calculando numéricamente sus autovalores y autovectores, sea calculando el efecto de un gran número de jugadas a partir de las potencias M^2, M^3 y sucesivas. Gracias al teorema general de Markov, estos dos métodos son matemáticamente equivalentes.



3. La distribución de probabilidad a largo plazo indica que la casilla con mayor probabilidad de ocuparse es la Cárcel

La tabla muestra las probabilidades de ocupación a largo plazo de las distintas casillas [*véase la figura 3*]. La característica más llamativa es que los jugadores tienen casi doble probabilidad de ocupar la Cárcel (5,89 por ciento) que cualquier otra casilla. Entre las restantes, la más frecuentada es la Avenida de los Reyes Católicos (3,18 por ciento). De los ferrocarriles, la Estación del Mediodía es la ocupada con mayor frecuencia (3,06 por ciento), seguida inmediatamente por la de Estación de Goya (2,99 por ciento) y la de Delicias (2,91 por ciento); sin embargo, la probabilidad de ocupar la Estación del Norte es mucho menor (2,44 por ciento). La razón de que así sea es que, a diferencia de las otras, Norte no tiene asociada una carta de SUERTE. Entre los servicios públicos, la Compañía de Aguas (2,81 por ciento) es la favorita de la fortuna, siendo la Compañía de Electricidad marginalmente menos probable (2,62 por ciento). SALIDA (3,11 por ciento) es la tercera de las casillas menos probables, exceptuada la de VAYA A LA CARCEL (cuyo tanto por ciento de ocupación es 0, por necesidad lógica).

Friddell fue más allá y analizó el mercado inmobiliario del Monopoly, que es lo que realmente hace interesante al juego. Su propósito era encontrar el punto decisivo para comprar casas —el momento en que los ingresos empiezan a superar a los costos— y determinar las estrategias óptimas para adquirir casas y hoteles. Las exigencias del mercado inmobiliario dependen del número de jugadores y de la versión de las reglas que empleemos. Suponiendo que ya desde el principio se puedan adquirir casas, surge cierto número de principios generales:

- Aunque resulta más caro comprar casas al principio, haciéndolo así se alcanzará antes el punto decisivo.

- Con dos o menos casas, necesitaremos unas 20 jugadas para llegar al punto decisivo. Con tres casas se consigue una decidida mejora.

- Entre la casilla SALIDA y la Calle de María de Molina, la casilla de bienes raíces que presenta el punto decisivo más rápido es la Calle Serrano, que lo alcanza en unos 10 turnos.

No se evaluaron los bienes raíces situados más allá de la Calle Cea Bermúdez; Friddell dice que se de-

tuvo ahí porque nunca pensó que sus hallazgos llegaran a publicarse.

Muchos otros lectores aportaron observaciones interesantes, y me es posible mencionar a unos cuantos. Simulaciones realizadas por Earl A. Paddon, de Maryland Heights, así como los cálculos de David Weiblen, de Reston, confirmaron la distribución de las probabilidades. Weiblen señala que, en realidad, estas probabilidades no afectan a la "equitatividad" del juego, dado que todos los participantes tienen ante sí la misma situación. Desarrollando este punto de vista, añade que, "si las recompensas por ir a parar a casillas de pequeña probabilidad fueran desproporcionadamente grandes, se presentaría un problema. Un juego en el que un jugador puede lograr por pura suerte una gran ventaja no es justo". Weiblen concluye que el Monopoly no es injusto en este sentido.

Bruce Moskowitz, de East Setauket, comentó: "Cuando era joven jugué al Monopoly muchas veces con hermanos y amigos, y era cosa sabida que las casillas de color canela, como la Avenida de Felipe II, Calle Velázquez y la Calle Serrano, son especialmente valiosas, dado que hay una elevada probabilidad de ir a parar a una de ellas cuando se sale de la Cárcel." Esta sugerencia recibe confirmación en los cálculos, dado que estas tres propiedades figuran en el gráfico entre las 12 de más altas probabilidades.

Jonathan D. Simon, de Cambridge, me reconvino por sugerir que las propiedades baratas se habían situado al principio del juego con la intención de hacerlo más equitativo. "El Monopoly fue... creado durante la Gran Depresión por una sola persona, Charles Darrow, quien disponía de muchísimo tiempo libre, presumiblemente no deseado... Aunque luzca los atavíos de la opulencia, de la gordura y la riqueza, es (subrepticiamente) un juego de pobres. En prácticamente todos los campeonatos de Monopoly... las propiedades 'baratas' resultan ser las más importantes para 'monopolizar'... Las propiedades 'lucrativas'... son costosas de poseer y de construcción prohibitiva si se carece de la fuente de ingresos que proporciona la posesión de una grupo barato con casas." Entendido, aunque yo seguiría sosteniendo que situar una propiedad lucrativa en la primera mitad del tablero sería francamente injusto, de acuerdo con el criterio de Weiblen de que ningún jugador debería conseguir una gran ventaja sólo por puro azar. ¡Y no estoy nada convencido de que comprar un lote de propiedades baratas para luego alquilarlas sea una estrategia de pobres!

Acuse de recibo

Las esculturas de Alan St. George de la sección de julio hicieron surgir el tema de la construcción de objetos tridimensionales basados en poliedros regulares. William J. Sheppard, de Columbus, envió detalles de su perspicaz método para tallar un tetraedro o un octaedro regular a partir de madera maciza, señalando que estos "modelos, sólidos y robustos, son más convenientes que los modelos huecos construidos por el procedimiento de adosar triángulos equiláteros". Sus métodos pueden verse en el *Journal of Chemical Education*, vol. 44, página 683; noviembre de 1967.

Norman Gallatin, de Garrison, lleva un cuarto de siglo trabajando con los sólidos platónicos. Ha desarrollado notables esculturas, algunas de ellas, construidas con espejos. La foto representa una proyección en tres dimensiones de un hipercubo tetradimensional; en ella aprovecha hábilmente las reflexiones para crear un efecto complejo a partir de componentes simples.



"Vista tetradimensional Hipercubo III"

¿No habrá por ahí más escultores o modelistas matemáticos?

Libros

Javier de Lorenzo, Luis Alonso y Santiago Torres

Matemática

Española

LIE GROUPS, LIE ALGEBRAS, COHOMOLOGY AND SOME APPLICATIONS IN PHYSICS por J. A. de Azcárraga-J. M. Izquierdo. Cambridge University Press; Cambridge, l995.

La matemática no tiene como objetivo mirarse el ombligo, indicó hace ya tiempo Poincaré, frente a los formalismos que potenciaron la pérdida de finalidad del hacer matemático en gran parte de este siglo. Desde sus orígenes, el hacer matemático ha establecido modelos posibles de lo real. La geometría euclídea no sólo constituye una teoría formal hipotético deductiva basada en la demostración lógica, sino que es apoyatura técnica e instrumental de arquitectos, ingenieros y agrimensores.

Por su lado, el análisis diferencial establece el enlace entre la fisis y el hacer matemático al permitir estudiar el movimiento de los cuerpos, la mecánica. Filosofía natural como sinónimo de lo que hoy llamamos física, pero también identificación entre mecánica y ecuaciones diferenciales. Identificación que condiciona tanto la filosofía natural como la visión del mundo al aceptar un reduccionismo por el estudio local de los procesos físicos que, por integración, se convierte en estudio del proceso global. Inferencia apoyada en identificar determinación con predicción del comportamiento de los procesos en un espacio métrico euclídeo.

El hacer matemático, en cuanto constructor de modelos posibles de lo real, no se ha restringido al campo de las ecuaciones diferenciales lineales. Tras los trabajos de Poincaré y su enfoque cualitativo de los procesos físicos, se pasa a las ecuaciones diferenciales cualitativas, clave para el estudio de los procesos de estabilidad y, con ellos, de los procesos dinámicos deterministas pero no predecibles, que rompen con el estudio local de los fenómenos físicos y ponen la primacía en el enfoque global de los mismos.

Al análisis se une el álgebra. Una estructura como la de grupo permite establecer "leyes de la naturaleza" si se tienen presente las transformaciones que preserven las simetrías, y se convierte en clave para la física de partículas. Si las transformaciones en el entorno de un punto se estiman infinitesimales, su estudio puede realizarse a través de los grupos de Lie. Análisis y álgebra a las que debe unirse la topología y el estudio de variedades diferenciales y espacios fibrados. En esta línea unificadora de matemática y física, en lo que se califica de física teórica, se mueve el libro de Azcárraga e Izquierdo.

Los tres primeros capítulos constituyen la introducción de algunos temas que se consideran necesarios para el resto. Básicamente, una revisión de la geometría diferencial en la que los grupos de Lie y álgebras de Lie y sus relaciones ocupan lugar central. Frente a un tratamiento axiomático, los autores presentan los grupos de Lie en una línea más bien física, como grupos de transformaciones operando sobre una variedad diferenciable de dimensión finita. El capítulo 9 constituye una generalización al caso infinito dimensional. En esta revisión se incluyen la descripción de la teoría de conexiones sobre haces principales, así como unas nociones de grupos de cohomología y extensiones de grupos.

Los capítulos 4 a 7 contienen el núcleo temático principal y dan una introducción tanto de los grupos de Lie, álgebras de Lie y de la cohomología de las álgebras de Lie como de la teoría de extensiones de grupos. Esta última se hace a partir de la noción de sucesiones exactas de homomorfismos de grupos. El capítulo 7 contiene resultados de la teoría de extensiones a los grupos no-abelianos.

Un último apartado lo forman los capítulos 8 y 10. En ellos se estrecha la relación matemática y física con aplicaciones y generalizaciones de lo estudiado en los apartados anteriores. Se establecen conexiones entre la mecánica y la cohomología con revisiones del principio variacional y el teorema de Noether en la mecánica newtoniana; se introducen los términos Weis-Zumino, dados por sus formas diferenciales y que no dependen de la métrica, demostrando sus condiciones de consistencia, términos que permiten un nuevo enfoque del punto de vista lagrangiano. Se destaca el enlace entre la cohomología y la mecánica, mostrando que el tratamiento físico no es más que la contrapartida del más abstracto o matemático en algunos casos. Igualmente se pone de relieve el papel conceptual del descenso cohomológico en mécanica que lleva a discutir las anomalías clásicas, en las que se detienen en una aplicación particular, la de la partícula libre newtoniana. El estudio de las anomalías no sólo en la mecánica clásica centra el último capítulo. Como resultado, se plantea la posibilidad de teorías anómalas consistentes. (J. L.)

Las aves

Y su vuelo

THE ORIGIN AND EVOLUTION OF BIRDS, por Alan Feduccia. Yale University Press; New Haven-Londres, 1996.

THE SIMPLE SCIENCE OF FLIGHT. FROM INSECTS TO JUMBO JETS, por Henk Tennekes. The MIT Press; Cambridge, 1996. **RESTLESS ENERGY. A BIOGRAPHY OF WILLIAM ROWAN 1891-1957**, por Marianne Gosztonyi Ainley. Véhicule Press; Montreal, 1993.

THE NATURAL SCIENCE OF THE HUMAN SPECIES. AN INTRODUCTION TO COMPARATIVE BEHAVIORAL RESEARCH. THE "RUSSIAN MANUSCRIPT" (1944-1948), por Konrad Lorenz. The MIT Press; Cambridge, 1996. **HANDBOOK OF ETHOLOGICAL METHODS**, por Philip N. Lehner. Cambridge University Press; Cambridge, 1996.

THE BIRDS OF SOUTH AMERICA. THE SUBOSCINE PASSERINES, por Robert S. Ridgely y Guy Tudor. University of Texas Press; Austin, 1994.

Hay dominios privilegiados de la naturaleza donde el experto y el aficionado convergen en recíproca ayuda. Uno de ellos es el de las aves. La aparición reciente de trabajos que contemplan ese grupo animal desde

distintos flancos invita a reflexionar sobre el estado de la cuestión. Una introducción general al tema nos la ofrece la obra esperada de Alan Feduccia *The origin and evolution of birds*, donde, además, se hace justicia al trabajo paleontológico de investigadores argentinos (Bonaparte, Novas) y españoles (Sanz), conocidos por los lectores de la revista. Apoyado en el registro fósil, la bioquímica, la fisiología, la etología y el análisis estructural, Feduccia describe con llaneza y solidez la trayectoria de esos vertebrados, en su opinión, bajados de los árboles.

Se aparta, en efecto, de la tesis que retrotrae la procedencia de las aves hasta los dinosaurios terrestres, bípedos, remontadores del vuelo. Para él, arrancan de los arcosarios, tecodontos arbóreos que se las ingeniaron para aprovechar la energía barata que, en forma de gravedad, les proporcionaban los lugares altos. Desde las postrimerías del Pérmico hasta el Triásico transcurre un período de experimentación arbórea para formas reptilianas, protoaves de plumaje tosco que saltaron, primero, de rama en rama, luego se lanzaron en paracaída hasta dominar, por fin, el planeo y vuelo real. Las protoaves poseían poderosas mandíbulas y dedos de las manos.

A comienzos del Cretácico, quedó ya patente la bifurcación dicotómica entre aves sauriurinas, arcaizantes, y ornithurinas, voladoras y avanzadas. Caracterizábanse las primeras por su vuelo corto, cola carnosa, región pectoral primitiva y burda regulación de la temperatura (con tendencia a la exotermia). Tales limitaciones no impidieron que prosperasen en el Mesozoico tropical, hasta el punto de convertirse en las aves dominantes durante la edad de los Reptiles. Lo mismo que los mamíferos endotérmicos, las orniturinas de los albores del Cretácico iban a la zaga de las sauriurinas y permanecían confinadas en ambientes ribereños. El linaje de las Ornithurae está representado por el *Ambiortus* de Mongolia y el *Gansus* de China.

El cataclismo que acabó con el Cretácico diezmó las aves que poseían un menguado poder regulador de la temperatura. Sólo un pequeño grupo de orniturinas superó la crisis del Cretácico-Terciario. Los vacíos dejados por las especies extintas posibilitó la evolución y radiación explosiva de un grupúsculo de limícolas orniturinas, cuya diversificación creciente llegó hasta los órdenes modernos. Aconteció ello en unos 10 millones de años. Una segunda oleada de adaptación se produjo en las postrimerías del Oligoceno, que se intensificó durante el Mioceno, cuando los paseriformes llenaron las copas de los árboles.

Una vez adquirida por las aves la capacidad de vuelo, apenas si ha sufrido modificaciones. Puesto que las exigencias fisiológicas y anatómicas del vuelo son muy estrictas, las aves son verdaderas máquinas con tasas metabólicas muy altas y morfologías aerodinámicas ajustadísimas. Condición esencial para el vuelo es un tamaño pequeño. De las 9700 especies de aves vivas la inmensa mayoría pesa menos de 1 kilo y mide menos de 50 cm. La masa muscular, que cifra el 40 por ciento del peso corporal, se concentra sobre el esternón. Los huesos principales son huecos y pneumáticos, conectados directamente al saco aéreo y al sistema respiratorio.

La pérdida de la capacidad de vuelo obedece a razones, asimismo, adaptativas, que dan pie al autor para introducirse en el modo y tempo de la evolución. Las correderas acostumbran vivir en espacios abiertos que requieren una huida rápida o en islas donde no sufren la presión de depredadores; cuando éstos son otras aves, se trata de grupos con pico poderoso y garras modificadas (Falconiformes y Estrigiformes). A las aves de presa y otras actuales se dedica la segunda mitad del libro con un estudio pormenorizado de la alimentación por filtración en los patos y flamencos.

Sobre la física del vuelo, sobre los principios aerodinámicos que mantienen a las aves en el aire, ha escrito Henk Tennekes un librito delicioso: *The simple science of flight. From insects to jumbo jets*. De su lectura sale el convencimiento de que el ornitólogo deberá incorporar en su zurrón, junto con los prismáticos habituales, las nociones de sustentación, resistencia, carga alar o velocidad de crucero. En efecto, para entender las bases del rendimiento del vuelo hemos de atender al peso que pueden sostener las alas. La capacidad de transporte depende del tamaño del ala, de la velocidad y densidad del aire, y del ángulo alar.

La función del tamaño alar resulta inmediata, puesto que la sustentación aerodinámica del ala (L) es proporcional a su superficie (S). Cuanto mayor sea el ala, mayor peso podrá aguantar. Menos directa es la relación



Aegotheles novaezealandiae, *ave fósil de Nueva Zelanda, recreada por John P. O'Neill*

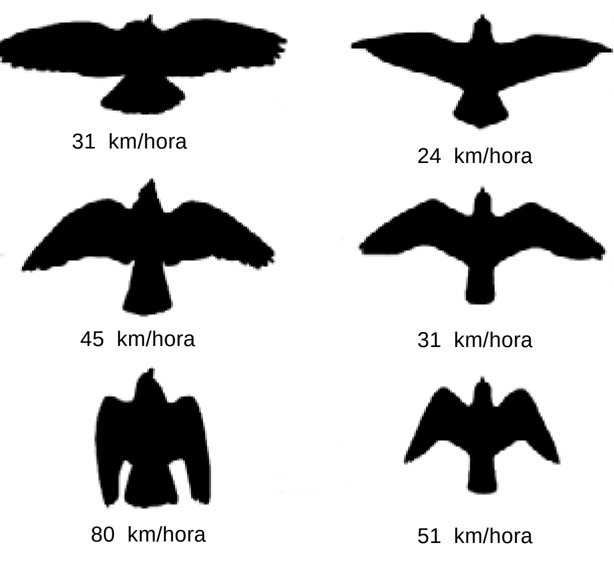
entre sustentación y velocidad del aire. Si llamamos *V* a la velocidad del aire y *d* a su densidad, entonces el flujo de masa del aire que rodea a las alas es proporcional a *d* multiplicado por *V*, (*dV*). Pero sabemos por Newton que la fuerza generada por el flujo del aire en torno a las alas es proporcional a *V* multiplicado por *dV*, dV^2. Si uno vuela a doble velocidad e idéntico ángulo alar, la sustentación será cuatro veces mayor. Y si uno vuela a una altura de 12 kilómetros, donde la densidad es la cuarta parte de la densidad a nivel del mar, deberá volar el doble de rápido para sostener el mismo peso.

Las aves y los aviones pueden modificar el ángulo de ataque (formado por el ala con el flujo de aire) para acomodarse a las circunstancias. Vuelan morro arriba, con un ángulo de ataque alto, cuando quieren avanzar despacio; morro abajo, para volar deprisa. Emplean, sin embargo, el mismo ángulo de ataque (unos 6 grados) en velocidad de crucero de grandes distancias. Puesto que las alas tienen que aguantar el peso del animal contra la fuerza de la gravedad, la sustentación *L* debe ser igual a su peso *W*. La sustentación es proporcional a la superficie alar *S* y a dV^2; por consiguiente, *W*, el peso, será igual a 0,3 dV^2S. (El valor de 0,3 está relacionado con el ángulo de ataque en vuelo de largas distancias, para el que se ha adoptado un ángulo promedio de 6 grados.)

En las aves la carga alar y la velocidad de crucero suelen aumentar conforme adquieren mayor peso. Pero la tasa con que lo hacen no parece ser lineal: el albatros pesa 74 veces más que el charrán común, pero su carga alar es sólo seis veces superior y vuela tan sólo 2,5 veces más deprisa. Palomas y halcones pliegan las alas a medida que aumentan su velocidad. Cuando un ave se dispone a aterrizar, comienza por extender las alas, separando las plumas primarias si puede. Es lo mismo que hacen los aviones cuando abren los alerones para aterrizar.

¿Qué decir de la energía requerida? Un colibrí consume su propio peso en miel cada día, esto es, un 4 por ciento de su peso corporal por hora; el avión 747, un 3 por ciento de su peso cada hora. Cuando oímos cantar un pájaro en el jardín, lo más seguro es que esté ahuyentado a los competidores del entorno, para así ahorrarse los vuelos de defensa del territorio; gastaría muchísima energía en los viajes de ida y vuelta. Lo mismo vale para los que deben alimentar sus polluelos en el nido; han de escoger muy bien sus presas entre las orugas que distan un kilómetro y los gusanos de la umbría de los alrededores. Si erraran en los cálculos, gastarían más energía en el vuelo que la que pudieran reportarle a sus pequeñuelos.

La tasa metabólica basal de las aves es de unos 20 watts por kilogramo de peso corporal, lo que decuplica ese parámetro en humanos. En vuelo continuo de aleteo, el ave puede generar unos 100 watts de potencia por kilogramo de masa muscular. El mínimo consumo de energía por unidad de distancia se consigue a una velocidad bastante rápida. Las aves, lo mismo que los aviones, deben volar raudas para ahorrar energía. *Sthenelides olor*, un cisne, vuela con una velocidad de crucero de unos 24 metros por segundo. Pesa unos 10 kilogramos; de éstos, dos corresponden a sus músculos de vuelo. En vuelo de crucero el gasto energético es de unos 100 watts por kilogramo. Durante un viaje a larga distancia, la musculatura alar del cisne aporta unos 200 watts de potencia mecánica. Puesto que el rendimiento de la conversión de la energía encerrada en los nutrientes es de sólo un 25 por ciento, el cisne necesita consumir cuatro veces esa energía extraída de la nutrición: 800 watts, u 800 joules por segundo. A una velocidad de 24 metros por segundo, esto corresponde a un consumo energético de 33 joules por metro. La energía le viene suministrada por la grasa almacenada en el pecho del animal.



Las aves doblan las alas, es decir, reducen su superficie alar, conforme aceleran su velocidad de vuelo. A la izquierda, una paloma; a la derecha, un halcón

Las aves grandes tienen cargas alares y velocidad del aire (*V*) mayores que las aves pequeñas, lo que constituye una ventaja en el mar. Además, las aves marinas deben cubrir largas distancias; les importa, pues, un consumo de energía por kilómetro que sea bajo. Sus alas están preparadas para ello. Las alas estrechas de gaviotas, charranes y albatros contrastan con las alas anchas de buitres, cóndores y águilas. Estas grandes aves de presa no recorren largas distancias, sino que remontan el vuelo en círculo, aprovechándose del movimiento ascendente de las corrientes de aire caliente. Mediante un vuelo lento, las aves de presa en ascensión minimizan el consumo de energía por unidad de tiempo. Muchas especies saben dejarse llevar sin batir las alas; el quid estriba en hallar movimientos de aire ascendentes de suficiente fuerza. Cuando la tasa a la que el aire eleva el ave es igual a la tasa de caída, el pájaro puede permanecer indefinidamente en suspensión. Y si el movimiento ascendente del aire es más fuerte que la velocidad de desplome, puede el ave ganar altura si lo desea.

El vuelo facilita el fenómeno de la migración por distante que se encuentre el punto de destino. Debemos a William Rowan (1891-1957) el conocimiento de la fisiología subyacente bajo esa tendencia nómada. (Rowan aupó también a categoría científica la fotobiología.) En *Restless energy*, Marianne Gosztonyi Ainley ha pergeñado con sobriedad documental y fino análisis de las ideas el relato de una vida transterrada desde la helvética Schlössli hasta los fríos de Alberta, pasando por Francia e Inglaterra.

Su retrato responde a una plantilla común entre los naturalistas de los dos últimos siglos. Trato familiar en su niñez con cigüeñas, los grandes migradores que anidaban en Europa e invernaban en Africa. Novillos de adolescencia al aire libre escapando de la rigidez escolar o enfrascamiento en la lectura de libros ilustrados y guías, de tanta tradición en Inglaterra. En un primer viaje a Canadá conoció a Alex G. Lawrence, quien le introdujo en la ornitología del continente. De esa travesía de juventud se trajo una

espléndida colección de aves, así como esquemas y esbozos de las asociaciones entre zonas de apareamiento y zonas de alimentación.

En 1917 se creó la Convención de Aves Migratorias firmada entre Estados Unidos y Canadá. Dos años más tarde, Rowan, que ya había publicado algunos trabajos, entra en el departamento de zoología de la Universidad de Winnipeg. Muy pronto comienza a estudiar la migración de ciertos paseriformes que bajaban a América del Sur para invernar, y de donde subían en primavera en busca de zonas de apareamiento, que para la mayoría de las especies se encuentran en el cinturón boscoso boreal. Amplía su campo de interés con la caracterización de los ecosistemas de la estación biológica de Shoal Lake.

En 1920 se traslada a la Universidad de Alberta, donde transcurrirá su larguísima vida académica. Tuvo allí unos comienzos difíciles, sin tiempo oficial para el trabajo de campo, que hubo de robar de los fines de semana. Clases, prácticas de laboratorio, cuidado de la biblioteca y corrección de exámenes se sucedían sin solución de continuidad y sin permitirle centrarse en la ecología y embriología de las aves, que, veía, le habrían de franquear el conocimiento de los ciclos biológicos.

Para Rowan la migración formaba parte del ciclo de reproducción anual. Se evidencia en “Observations on the breeding habits of the merlin”, escrito de 1921 donde examinaba la dispersión y zona de reproducción de este falcónido. Abordó también la migración de los carádridos. Sospechó que los juveniles de chorlito dorado (*Charadrius pluvialis*) seguían una ruta de migración diferente de los adultos. La observación continua a través de las estaciones le permitieron percibir las diferencias en edad, plumaje y sexo de las migrantes de primavera y otoño. Advirtió el dispar tamaño de las gónadas entre las aves que migraban hacia el norte y las aves, de la misma especie, que migraban hacia el sur. Así empezó a replantearse los factores determinantes de la migración.

Veníase atribuyendo el desencadenante de la migración a la temperatura y presión barométrica. Rowan, por contra, lo cifró en la longitud del día. Consideró el viaje migratorio una fase del ciclo sexual, dependiente del desarrollo de las gónadas. Por tanto, si lograba provocar artificialmente la maduración de las gónadas en una estación distinta de la habitual, induciría la migración diferenciada: los adultos hacia el norte, los juveniles hacia el sur. E inició los experimentos sobre fotoperiodismo. Llegó a la conclusión de que la luz influía en las gónadas, que influían en la migración.

En el comportamiento de las aves vieron los fundadores de la etología un modelo idóneo para descubrir las bases de la conducta animal comparada. Se pretendía ya articular ese enfoque en los primeros esbozos, como en el célebre manuscrito recuperado de Konrad Lorenz (1903-89), vertido al inglés por su discípulo Robert Martin, con el título *The natural science of human species. An introduction to comparative behavioral research*. Lorenz, que había estudiado y enseñado medicina en Viena, se entregó por entero a la psicología animal a mediados de los treinta. (En 1935 avanzó su tesis de la impronta, que ejemplificaba en el polluelo que toma por representación de su especie al primer objeto que ve en movimiento. Aunque suele tratarse de su progenitor, demostró que podía ser también un modelo, un globo, un tractor o un humano.)

El manuscrito, que compuso durante los cuatro años pasados en el campo de concentración de Yerevan, en la Armenia soviética, es un tratado de filosofía y etología teórica. (Para adentrarse en la etología práctica el lector dispone de una segunda edición actualizada del *Handbook of ethological methods*, de Philip N. Lehner.) El cómo logró salir el manuscrito airoso de la férrea censura soviética puede explicarse por su reiterada defensa del materialismo científico, la doctrina oficial del régimen.

Lorenz se propone escribir un tratado de etología comparada desde una perspectiva evolutiva y con el horizonte puesto en la interpretación de la conducta humana. Todos los caracteres, anatómicos o de otro tipo, están vinculados a una historia que se extiende a lo largo de millones de años durante los cuales las formas “superiores” se desarrollaron a partir de formas “inferiores”. La estructura de cualquier forma superior de comportamiento sólo cabe entenderla desde los precursores elementales que han condicionado y posibilitado su aparición.

Hay en los humanos muchos vestigios que denuncian un origen animal inferior. Tales huellas —en la estructura de las emociones, el pensamiento y la acción— son indispensables para entender nuestra sociedad. Ciertas pautas de respuesta ancestrales y específicas, los instintos, continúan influyendo en la conducta humana. El animal que llevamos dentro tiene mucho que ver con las manifestaciones grupales de nuestros días. Y sin el conocimiento de las estructuras ancestrales y prehumanas que se han mantenido en la conducta humana no podríamos comprender los procesos mentales superiores; constituyen su base en el sentido más estricto del término.

De ello infiere Lorenz que la etología tiene que ver también con la filosofía. Con unos prolegómenos filosóficos comienza la obra, que son un repaso del papel de la inducción en la ciencia y una confesión de su adscripción al materialismo dialéctico, más afirmada que razonada a la postre. Metido ya en etología comparada, insiste en la presencia de sistemas complejos de pautas de comportamiento innato (es decir, reflejos no condicionados y automatismos endógenos). A la manera de los órganos, esas respuestas muestran sólo una variabilidad limitada de un individuo a otro e, igual que los órganos, pueden adaptarse a condiciones ambientales cambiantes. Esas respuestas comparten con todas las demás estructuras fijas del organismo la propiedad dual de aportar apoyo y asegurar la inflexibilidad. Detrás de los conflictos del hombre con el orden establecido se halla la inflexibilidad de las pautas innatas del comportamiento social.

Con los reflejos existe, en la conducta animal y humana, una segunda función elemental del sistema nervioso central. Las pautas motoras instintivas dependen de procesos endógenos, automáticos y rítmicos, de producción de estímulos en el propio sistema nervioso central. Este descubrimiento de la peculiaridad fisiológica de las pautas motoras instintivas da sentido al fenómeno de la espontaneidad en el comportamiento de animales y humanos. Más aún, esas pautas motoras instintivas, las respuestas de orientación y los esquemas innatos vienen a conferir contenido biológico a la epistemología de Kant. Las formas puras del entendimiento y la intuición, independientes de experiencias anteriores, reciben ahora una interpretación de corte fisiológico y filogenético.

Del prontuario de recomendaciones generales en que se sumerge luego el austriaco nos saca Lehner con el manual citado. También él forjó su andadura etológica investigando un ave, el pavo (*Meleagris gallopavo)*, siguiendo la estela de Lorenz y los ánades, Tinbergen y las gaviotas y Lehrman y las palomas. Suele haber siempre alguna especie, si no más,

detrás de cada concepto etológico, ya sea para fundarlo ya sea para corroborarlo. Para comprobar la hipótesis de Tinbergen sobre las pautas de búsqueda de alimento que fían en determinadas claves, Alcock escogió un mirlo, Croze un cuervo y Royama un herrerillo.

Lehner entiende que la etología debe abarcar todos los movimientos y sensaciones a través de los cuales los animales y los humanos interactúan con el medio físico, biótico y social. Compete al etólogo acotar los niveles de la conducta, las áreas de estudio y la jerarquización de las cuestiones. Si ilustramos este postulado con la oca del Canadá (*Branta canadensis*), tendremos que los niveles de la conducta serían la especie (estacionalidad de las migraciones), población (bandadas migradoras), núcleo familiar (patrón de vuelo hacia una fuente de alimento), pares (pelea entre machos), individuo (marcha hacia el bebedero), tipo de comportamiento (alimentario), acto de comportamiento (picoteo de las plantas), partes del cuerpo (patas), músculos (gastrocnemio), neuronas (nervios de la tibia).

Reduce a cuatro los dominios de la etología: función o consecuencia inmediata de determinado comportamiento, mecanismos desencadenantes de cierta pauta de conducta, ontogenia de la conducta hasta la maduración y a través del aprendizaje, y, al fin, la evolución filogenética de un patrón de comportamiento. Por último, estas son las cuestiones que el etólogo ha de plantearse en su investigación: qué conducta, quién la tipifica, cuándo, dónde, cómo y por qué la expresa. O en el ejemplo citadísimo de McFarland: ¿Por qué las aves se posan sobre los *huevos*?, ¿Por qué las aves *se posan* sobre los huevos?, ¿Por qué *las aves* se posan sobre los huevos?, ¿*Por qué* las aves se posan sobre los huevos?

Si antaño la etología se nutría de las observaciones, ahora la atención se centra en los procesos neurales. En todo caso, el método empleado pivota sobre varias operaciones fundamentales. Tras la identificación de los objetos o variables a medir, hemos de establecer las unidades de medición. Se comparan luego los hechos reales con los previstos, para poder finalmente interpretar el significado de los acontecimientos observados.

Desde la embriogénesis hasta la muerte, el animal siempre está actuando. En su desenvolvimiento, se rige por determinadas pautas, en las que hemos de saber acotar qué fracción se hereda y qué fracción se adquiere por aprendizaje. Pensemos, por ejemplo, en el canto de las aves. Conocemos ya los centros cerebrales y vías nerviosas necesarias para el desarrollo, memoria y ejecución del canto. Los centros cerebrales del canto surgen en parte de una impronta genética y en parte de una estimulación endógena y exógena. Las hormonas (estímulos endógenos) necesarias para propiciar la maduración se excitan asimismo por estímulos exógenos (fotoperíodo y temperatura). En algunas especies esos centros cerebrales se modifican por estimulación exógena en forma de cantos emitidos por otros machos de la misma especie con el fin de transformar el "molde innato" en un molde adquirido.

Detallando algo más, los estímulos son cambios que se producen en el medio (externo o interno) a los que el animal suele responder. El contexto en que se produce el estímulo determinará su eficacia. Además de iniciar y orientar el comportamiento, los estímulos facilitan y mantienen la conducta. Las propias necesidades fisiológicas están señaladas por estímulos endógenos que elicitan un comportamiento diseñado para salir al paso de tales exigencias: una baja concentración de azúcar en sangre conduce al "estado de hambre" que estimula al animal a buscar, encontrar e ingerir el alimento.

Para crear un buen modelo etológico el investigador necesita acatar el principio de Krogh que exige buscar la especie en que mejor se exprese el comportamiento analizado. Las guías de campo constituyen un primer paso. Algunas son excepcionales como *The birds of South America. The suboscine passerines*, de Robert S. Ridgely y Guy Tudor. Tierra de increíbles recursos naturales, el continente sudmericano abunda en vegetales y animales. Sólo entre las aves, hay unas 3100 especies residentes o migratorias.

Pero no debemos detenernos en la mera ponderación de semejante tesoro faunístico. Muchas especies se hallan amenazadas de extinción. He aquí otra razón poderosa para su inventario. Este volumen segundo (el primero se dedicó a *The oscine passerines*) sobrepasa el millar de especies. Junto a una soberbia iconografía, el texto suministra información extensa sobre la zona donde medran, extensión, hábitos y cantos de las aves. Los autores han completado la labor de campo con el examen detenido de especímenes museísticos de cada subespecie para apostillar con minuciosidad las pautas en la variación del plumaje intra e interespecíficamente.

Paseriformes son la mitad de las especies de aves del mundo. De distribución cosmopolita, han ocupado todas las regiones salvo la Antártida y remotas islas oceánicas. No hay especies acuáticas propiamente dichas. Suelen alcanzar un tamaño reducido; cotingas y oropéndolas son quizá las mayores. Los Paseriformes poseen siringe, una adaptación para el canto. Tyranni y Passeri, los dos grandes grupos paseriformes, se distinguen entre sí por la morfología de la siringe, más simple en los primeros. Muchos Tyranni, sin embargo, emiten cantos de amplio registro y no exentos de belleza. La mayoría de los Tyranni se dan en los neotrópicos; sólo unas cuantas familias (Pittidae y Eurylamidae) alegran el Viejo Mundo.

No hay discrepancias sobre la unidades taxonómicas superiores (orden y subórdenes) de los Paseriformes. Más controvertidas resultan las relaciones de parentesco cuando descendemos a las familias y subfamilias. Los autores prefieren obviar farragosas disquisiciones sobre clados para extenderse en las notas distintivas de cada especie.

Por sus páginas se van sucediendo las Tyrannidae (atrapamoscas), aves de plumaje oliváceo y exiguo dimorfismo sexual; las Furnariidae (horneros), de nidos abovedados, de los que reciben el nombre, y amplísima diversidad específica; las Dendrocolaptidae, consideradas hoy una subfamilia, Dendrocolaptinae, incluida dentro de las Furnariidae, amantes de humedales y bosques de montaña; las Formicariidae (hormigueros), familia desdoblada en dos, la de hormigueros típicos (Thamnophiliidae) y los hormigueros de tierra (Formicariidae); esta última abarcaría los géneros *Formicarius*, *Chamaeza*, *Grallaria*, *Pittasoma*, *Myrmothera*, *Hylopezus* y *Grallaricula*. Thamnophiliidae y Formicariidae difieren en el grado de dimorfismo sexual. A diferencia de los Formicariidae, sólo unos pocos ejemplares de la familia Thamnophiliidae son terrestres; la mayoría prefiere la espesura arbórea; los Thamnophiliidae muestran un fuerte dimorfismo sexual en el plumaje.

Otras familias paseriformes son las Conopophagidae, avecillas de la pluviselva amazónica con claro dimorfismo sexual; las Rhinocryptidae (tapaculos), que suben hasta Costa Rica y tejen nidos artísticos; las Pipridae (saltarines), de cabeza grande y pico corto que desarrolla el comportamiento de lek para atraer las hembras; las Cotingidae (cotingas), arbóreos de coloración intensa y brillantísima. (L. A.)

Citogenética

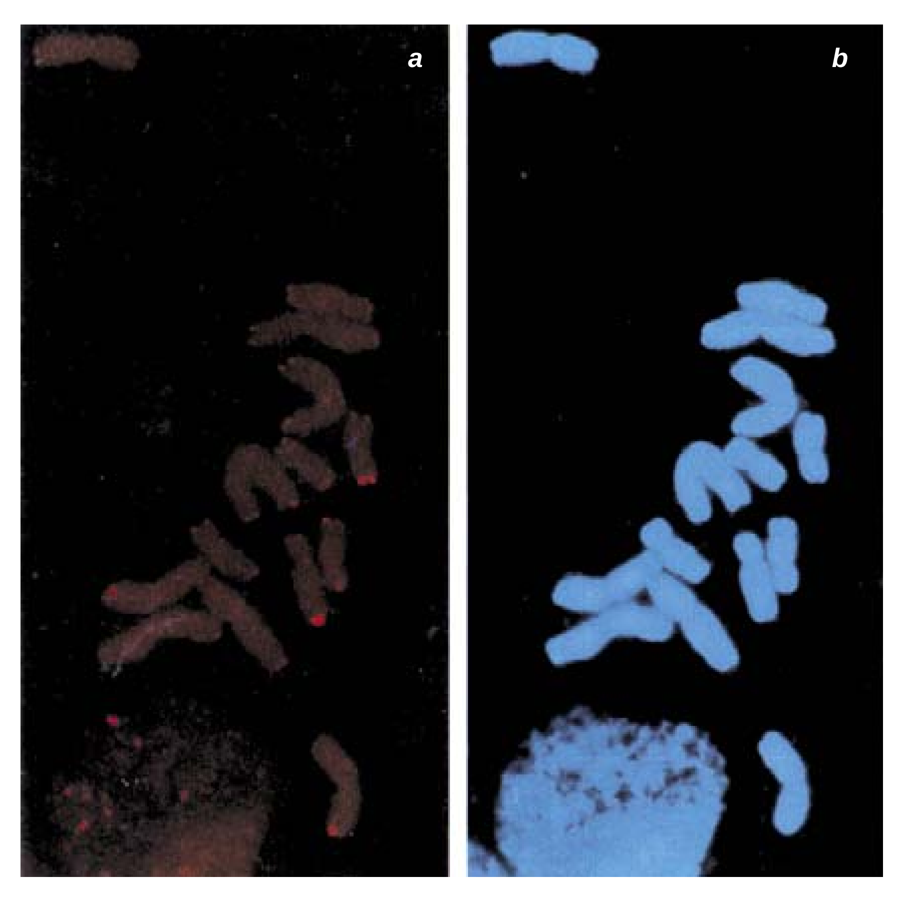
Cromosomas

THE CHROMOSOME. J. S. Heslop-Harrison y R. B. Flavell. Bios Scientific Publishers Ltd. Oxford, 1993.

Recopila este libro las aportaciones más interesantes al simposio *John Innes Symposium* de 1992, dedicado en esa ocasión a revisar algunos de los aspectos más notables de la biología de los cromosomas. Las publicaciones de este tipo tienen sus ventajas e inconvenientes. Entre las primeras, que permite de forma rápida adquirir una visión global y plural de una parcela de la ciencia.

La necesidad, sin embargo, de complacer al máximo número de investigadores plantea también posibles inconvenientes. Entre ellos, que los temas se dispersen excesivamente, que el grado de interés de las revisiones sea desigual y que el poco espacio disponible perjudique la profundización y claridad de los trabajos. Y este libro no es ajeno a todo ello. Su extensión, 260 páginas, y el número de contribuciones, 18, condicionan un número medio de páginas que resulta en muchos casos insuficiente para un tratamiento adecuado de los temas. Esto es, un tratamiento en el que antecedentes, estado actual y perspectivas futuras de los problemas ayude a introducirnos adecuadamente en los mismos. La conclusión, por tanto, es que los libros de estas características son, en general, útiles como fuente de información para iniciados, pero difíciles de digerir para los aficionados. Ello, por supuesto, no resta validez a la publicación. Parcela, por cierto, muy concurrida en los últimos años, ya que cada vez son más las revistas especializadas que revisan de forma sistemática y periódica todos los campos de la ciencia, con la ventaja de que estas publicaciones son más ágiles y llegan a un número mayor de lectores.

El contenido del libro es variado y dedica especial atención a aspectos de la biología de los cromosomas quizás algo eclipsados en los últimos años, por el creciente protagonismo de la secuencia. Protagonismo alimentado en buena medida por los extraordinarios avances técnicos y, por qué no decirlo, porque en muchos casos ese tipo de trabajos no conlleva grandes retos intelectuales. La secuencia, sin embargo, no está ausente en *The Chromosome*. Sendos capítulos están dedicados a revisar el estado de algunos de los grandes proyectos de secuenciación, concretamente el de la bacteria *Escherichia coli*, la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, y plantas como *Arabidopsis thaliana* o la más común *Oryza sativa* (el arroz). Qué duda cabe que la información que suministran estas grandes empresas trasciende mucho más allá de la mera curiosidad por la secuencia.



Telómeros y subtelómeros de la cebada

Bacterias, levaduras y plantas representan en este caso algo más que una simple elección, constituyen de hecho una línea argumental que traza el camino desde lo más (aparentemente) simple a lo más complejo. Pero no sólo eso, también nos enseña que, muchas veces, lo más complejo no es más que una combinatoria de situaciones (más) sencillas. Y esto es algo que los investigadores saben desde hace mucho tiempo. Por ello, para entender cómo funcionan ciertos procesos en organismos superiores se recurre a situaciones análogas en organismos fáciles de manipular y de los que se puedan extraer conclusiones que, en muchos casos, pueden ser relativamente extrapolables a aquéllos. Así, fenómenos tan complejos como la recombinación pueden estudiarse en modelos sencillos (fagos, hongos), con procedimientos aún no disponibles para organismos más complejos. Los múltiples factores que intervienen en el control de la replicación del material genético, cómo se resuelve la replicación de los cromosomas lineales, el posible papel de las estructuras terminales de los cromosomas eucarióticos (telómeros) en fenómenos tan fascinantes como el envejecimiento celular, y el problema del reparto cromosómico en bacterias, un campo paradojicamente más desarrollado en células eucariotas, son también algunos de los temas que se revisan en esta obra.

El resto de los capítulos del libro aborda fenómenos asociados con la supresión de la actividad génica, algunos de ellos clásicos como el efecto de posición variegada (inactivación reversible de un gen por heterocromatinización), otros más novedosos, como la *trans*-inactivación (reducción en el número de copias de transcritos de un gen) y la impronta parental (los dos genomas parentales no son funcionalmente equivalentes). Finalmente, la conjunción de las modernas tecnologías en microscopía y la hibridación molecular se pone al servicio de los estudios sobre organización estructural y funcional del núcleo. (S. T.)

Indice anual

Este índice contiene los nombres de los autores y los títulos de los artículos aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 1996.*

AUTORES

TITULOS

TALLER Y LABORATORIO

Autor: Shawn Carlson

CREACIONES INFORMATICAS

Autor: Jean-Paul Delahaye

CAVILACIONES HISTORICAS

JUEGOS MATEMATICOS

Autor: Ian Stewart

Ideas aplicadas

Chip Holt

Fotocopiadoras



EL INVENTOR CHESTER F. CARLSON recrea el experimento que marcó la aparición de la xerografía. La máquina original nunca funcionó a la perfección, pero facilitó el prototipo técnico de las fotocopiadoras modernas.

10.-22.-38 ASTORIA

LA XEROGRAFIA nació el 22 de octubre de 1938, en Astoria, Queens. Carlson aplicó el proceso para imprimir estos caracteres sobre una diapositiva de vidrio empleando tinta china.

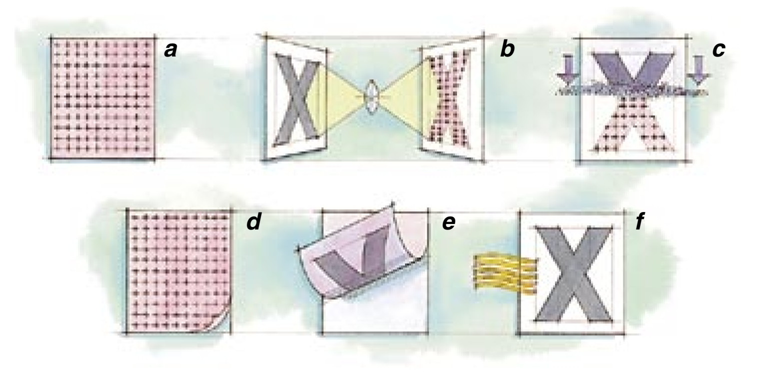
El término "xerografía", o empleo de fenómenos fotoeléctricos para transferir una imagen desde una hoja de papel a otra, procede de las palabras griegas "ξηρός" (seco) y "γράφω" (escribir). Chester F. Carlson, agente de patentes de la ciudad de Nueva York que había estudiado química en el Instituto de Tecnología de California, mostró esta técnica hace 58 años en un laboratorio improvisado encima de un bar de Astoria, Queens.

Durante seis años, más de veinte compañías rechazaron las propuestas de Carlson para desarrollar esa técnica. En 1944, el Instituto Battelle Memorial, ente no lucrativo de investigación, concertó con Carlson un acuerdo de explotación conjunta de la patente. Finalmente, en 1947, Battelle firmó un contrato de desarrollo con Haloid, una empresa de Rochester que fabricaba papel fotográfico y que más tarde se convirtió en Xerox Corporation. La primera máquina xerográfica apareció en el mercado en 1949, pero era lenta, sucia y difícil de usar. Sin embargo, diez años después Xerox presentaba la primera copiadora de oficina, la 914, que fue la base de la actual multimillonaria industria.

CHIP HOLT es vicepresidente de Xerox Corporation.

ALIMENTADOR DE ORIGINALES
BANDA FOTORRECEPTORA
RODILLOS TERMICOS
RODILLO MAGNETICO
BANDEJAS DE PAPEL

UNA VEZ SITUADO el documento a copiar sobre una plataforma transparente, su imagen se proyecta sobre una banda fotoreceptora (el tambor) merced a un dispositivo de lámparas, espejos y lentes. La carga electrostática de la banda se desvanece en las zonas que reciben luz procedente de la imagen proyectada. Los rodillos magnéticos frotan la banda con tinta en polvo (tóner), la cual se adhiere a la parte de la banda que contiene la imagen gracias a su carga estática. Una hoja de papel de copia que se aproxima a la banda recibe asimismo una carga estática lo bastante intensa para arrancar de la banda la imagen en tóner. Seguidamente un juego de rodillos aplican calor y presión para fijar definitivamente la imagen. Para el fotocopiado en color se sigue un proceso de varias etapas: se produce el barrido de la imagen a través de filtros de color, y luego se aplican tóneres distintos para magenta, cian, amarillo y negro.



EL COPIADO EN SECO aplica un doble principio: el de la mutua atracción que ejercen los cuerpos con carga eléctrica de signo contrario y el de que algunos materiales conducen mejor la electricidad al quedar expuestos a la luz. En el proceso xerográfico básico, una superficie fotoconductora recibe una carga eléctrica positiva (*a*). Seguidamente, sobre esa superficie se proyecta una imagen; como las zonas no iluminadas (o sea, sin imagen) se hacen más conductoras, su carga se disipa (*b*). Un polvo negativamente cargado y esparcido sobre la superficie se adhiere por atracción electrostática a las zonas donde hay imagen y que están cargadas positivamente (*c*). Luego, una hoja de papel recibe una carga positiva (*d*) y se coloca sobre la superficie, donde atrae el polvo cargado negativamente (*e*). Finalmente, el calor fija la imagen grabada por el polvo sobre el papel (*f*).